

Anssi Lampinen

# **Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen**

**Kirjallisuusselvitys**

**Tiehallinnon selvityksiä 44/2004**

Anssi Lampinen

# **Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen**

Kirjallisuusselvitys

**Tiehallinnon selvityksiä 44/2004**

Verkkajulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 951-803-331-5

TIEH 3200894-v

Helsinki 2005

TIEHALLINTO

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelinvaihde 0204 2211

**Anssi Lampinen: Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen.** Helsinki 2004. Tiehallinto, suunnittelu. Tiehallinnon selvityksiä 44/2004. 67 s. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-331-5, TIEH 3200894-v.

**Asiasanat:** pituus, tasaisuus, polttoaineenkulutus  
**Aiheluokka:** 33, 96

## TIIVISTELMÄ

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kuvata tien pituusprofiilin vaikutusta sekä raskaiden ajoneuvojen että henkilöautojen renkaiden vierintävastukseen. Vierintävastuksella ja ajoneuvojen polttoainekulutuksella puolestaan on selvä yhteys. Tavoitteena on siten osoittaa konkreettisesti se, millaisia polttoainekulutussäästöjä on mahdollista saavuttaa tien pinnan tasaisuutta (profiilia) parantamalla. Tarkastelu kohdistuu tällöin karkeus- ja epätasaisuuskomponentteihin ja niiden keskinäisiin suhteisiin vierintävastusta ajatellen.

Tutkimus on toteutettu kirjallisen lähtöaineiston perusteella ilman kenttäkokeita. Kirjallista lähdemateriaalia on olemassa runsaastikin, sillä päällysteiden pinnan vaikutukset ajoneuvo-, aika- ja onnettomuuskustannuksiin on eräs keskeisistä tutkimusalueista tierakennustekniikassa.

Vierintävastus on vain yksi polttoaineenkulutukseen vaikuttavista tekijöistä, mutta sillä on suuruusluokaltaan huomattava vaikutus polttoainetalouteen. Vierintävastuksen ja polttoainekulutuksen välisistä suhteista on olemassa runsaasti aineistoa niiden luotettavan yhteyden selvittämiseksi ja siten vierintävastuksen muuttamiseksi kvantitatiiviseksi taloudelliseksi tekijäksi. Vaikutuspotentiaalia kuvaa se, että 1 % muutos polttoainekulutuksessa vastaa kuorma-autoliikenteessä 6 M€:n ja henkilöautoliikenteessä 5 M€:n muutosta verottomissa hinnoissa (verollisina vastaavasti 14/17 M€).

Päällysteiden epätasaisuutta kuvataan tavallisimmin inventointiluonteisissa mittauksissa sekä myös päällysteiden laadunarvostelussa kansainvälisellä IRI-luvulla (International Roughness Index). IRI:n katsotaan olevan lähinnä kuljettajan ajomukavuutta kuvaava arvo, jonka käyttökelpoisuutta päällysteiden vierintävastuksen (ja sitä kautta polttoainekulutuksen) kuvaajana on myös haluttu selvittää. Päällysteiden pintaprofiilia kuvataan kansainvälisesti sen mikro-, makro- ja megakarkeudella sekä epätasaisuudella (=IRI). Vaikuttavat aallonpituusalueet ovat tällöin 0–0,5 mm (mikrokarkeus), 0,5–5 mm (makrokarkeus), 5–500 mm (megakarkeus) ja 0,5–50 m (IRI), kun taas sen ylittävä osuus kuuluu geometriaan.

Vierintävastuksen ja polttoaineenkulutuksen välillä puolestaan on seuraava yhteys: vierintävastuksen 10 % muutos vaikuttaa polttoaineenkulutukseen n. 1–4 %, keskiarvo henkilöautoille on 2 % ja kuorma-autoille 2,5 %. Päällysteen eri karkeuslajien osuudet vierintävastuksesta ovat suuruusluokaltaan seuraavat: mikrokarkeus 2–3 %, makrokarkeus 10 %, megakarkeus 12 % ja epätasaisuus 10 %.

Tutkimuksessa on tuotu esiin myös sellaisia uusia tuloksia, joille ei ole olemassa valmista teoreettista pohjaa. Tässä tutkimuksessa onkin esitetty uusi hypoteesi tien kantavuuden vaikutuksesta vierintävastukseen ja sen vaikutusmekanismista – mittaustuloksia on olemassa, mutta ei teoreettista tarkastelua tutkimustuloksen tueksi. Lisäksi esitetään suositus sekä nykyisten tasaisuusmittausmenetelmien tuloksien uudesta käytöstä että uudesta tien tasaisuuden tunnusluvusta PSD (Power Spectral Density), jolla IRI-lukua monipuolisemmin voidaan kuvata tien pintarakenteen vaikutusta eri kustannuslajeihin.



Vierintävastukseen vaikuttavat monet renkaiisiin ja ympäristöön liittyvät tekijät, kuten renkaan ilmanpaine, ilman ja renkaan lämpötila, ajonopeus, renkaan ominaisuudet, joiden vaikutusmekanismit vierintävastukseen on tunnettava, jotta itse päällysteen pintarakenteen vaikutus vierintävastukseen saadaan esiin.

Vierintävastukseen vaikuttavia muita tekijöitä ovat renkaan ominaisuudet, ajo-olosuhteet ja päällysteen laatu. Renkaan ominaisuudet ovat tärkeä tekijä, sillä renkaan valmistajalla on suuret mahdollisuudet vaikuttaa siihen. Renkaiden kehityksen eräs painopiste on juuri vierintävastuksen alentaminen. Siinä on onnistuttukin hyvin, ja nykyaikaiset renkaat – sekä henkilö- että kuorma-autorenkaat – ovat vierintävastusominaisuuksiltaan parantuneet kymmeniä prosentteja.

Ajo-olosuhteet vaikuttavat siten, että nopeudella ja renkaan lämpötilalla ja ulkoilman lämpötilalla on tietty tasapainoasema. Periaatteellisena tuloksena on se, että vakioituissa olosuhteissa ajonopeuden lisääminen kasvattaa vierintävastuskerrointa. Edelliseen liittyen toisaalta renkaan ilmanpainetta lisätessä vierintävastus pienenee.

**Anssi Lampinen:** Inverkan av vägens beläggnings ojämhet på rullmotstånd och bränsleförbrukning. Helsinki 2004. Vägförvaltningen, Vägförvaltningens utredningar 44/2004. 67 s. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-331-5, TIEH 3200894-v.

**Nyckelord:** längd, jämnhet, bränsleförbrukning

## SAMMANFATTNING

Avsikten med denna undersökning är att ge en bild av inverkan av vägens längdprofil på rullmotståndet av såväl tunga fordon som personbilers däck. Rullmotståndet och fordonens bränsleförbrukning igen har en klar samband. Avsikten är alltså att konkretiskt visa hurdana bränslebesparningar det är möjligt att nå genom förbättring av vägytans jämnhet (profil). Speciellt betrakta grovhets- och ojämnhetskomponenter och deras interna relationer med tanke på rullmotstånd.

Undersökningen grundar sig på litteraturundersökning utan fältprov. Det finns rikligt med källmaterial, för inverkan av beläggningsytan på fordon-, tid- och olyckskostnader är ett centralt undersökningsområde i vägbyggnadsteknik.

Rullmotståndet är bara en faktor som påverkar bränsleförbrukningen, men dess storleksgrad är betydande. Det finns rikligt med material om relationen mellan rullmotstånd och bränsleförbrukning för att tillförlitligt utreda deras samband och för att på det viset omvandla rullmotståndet till en kvantitativ ekonomisk faktor. Påverkningspotentialen förtecknas av att en förändring på 1 % i bränsleförbrukning motsvarar en prispförändring av 6 M€ i lastbiltrafik och 5 M€ i personbiltrafik utan skatt (med skatt respektive 14/17 M€).

Beläggningarnas ojämnheter beskrivs vanligen i inventeringsmätningar och också i kvalitativa bedömningar med det internationella IRI-värdet (International Roughness Index). IRI är närmast ett värde som beskriver förarens åkkomfort och dess användbarhet som indikator av rullmotståndet (och på så viset bränsleförbrukningen) har man också velat förklara. Beläggningarnas ytprofil betecknas internationellt med mikro-, makro-, och megagrovhet samt med ojämnheter (=IRI). Bestämmande våglängder är 0–0,5 mm (mikro-grovhet), 0,5–5 mm (makrogrovhet), 5–500 mm (megagrovhet) och 0,5–50 m (IRI), medan de värden som överstiger dessa hör till geometrin.

Rullmotståndet påverkas av många faktorer i samband med däck och omgivning, t.ex. däckets lufttryck, temperatur av luft och däck, körhastighet, däckets egenskaper, vars påverkningsmekanismer man bör känna till för att få fram beläggningsytans inverkan på rullmotståndet.

Andra faktorer som påverkar rullmotståndet är däckets egenskaper, körförhållanden och beläggningens kvalitet. Däckets egenskaper är en viktig faktor, för däcktillverkaren har stora möjligheter att påverka dem. En tyngdpunkt inom utvecklingen är just sänkning av rullmotståndet. Det har man också lyckats med och moderna däck – både för person- och lastbilar – har förbättrats med tiotals procent.

Körförhållandena påverkar så, att hastighet, däckens temperatur och luftens temperatur har en viss balans. I standardiserade förhållanden ökar hastighetsökningen i princip rullmotståndskoefficienten. Men å andra sidan ökning av däckens lufttryck minskar rullmotståndet.

Mellan rullmotståndet och bränsleförbrukningen finns det igen följande samband: en förändring på 10 % i rullmotstånd har en inverkan av 1–4 % på

bränsleförbrukning, medeltalet för personbilar är 2 % och 2,5 % för lastbilar. Beläggningens olika grovhetsgraders andelar av rullmotståndet är följande: mikrogrovhets 2–3 %, makrogrovhets 10 %, megagrovhets 12 % och ojämnhets 10 %.

Undersökningen har framfört också sådana nya resultat som inte har någon eksisterande teoretisk bakgrund. I denna undersökning har man framfört en ny hypotes om bärighetens inverkan på rullmotståndet och om dess påverkningssmekanismer – det finns mätningresultat i litteratur men ingen teoretisk granskning för att backa upp resultaten. Dessutom ger man en rekommendation för såväl nyanvändning av nuvarande jämnhetmätningssmekanismer som ett nytt värde för vägens jämnhet, PSD (Power Spectral Density), som skildrar vägytkonstruktionens inverkan på olika kostnadsslag mångsidigare än IRI-värdet.



**Anssi Lampinen:** Impact of unevenness of road pavement on rolling resistance and on fuel consumption. Helsinki 2004. Finnish Road Administration. Finnra Reports 44/2004. 67 p. ISSN 1459-1553, ISBN 951-803-331-5, TIEH 3200894-v.

**Keywords:** length, evenness, fuel consumption

## ABSTRACT

The aim of this study is to describe the impact of a road's longitudinal profile on rolling resistance of tyres of both lorries and cars. There is a clear relation between rolling resistance and fuel consumption. The aim is to find concrete proof on possibilities of saving in fuel consumption by improving the evenness (profile) of roads. Thus roughness and unevenness components are examined, as well as their internal relations in connection with rolling resistance.

The study has been carried out as literature research with no field tests. There is a lot of written material on the subject since the effect of pavement surface on vehicle, time and accident costs is one of the central areas in road construction technology research.

Rolling resistance is only one factor affecting fuel consumption but its effect on fuel economy is of great importance. There is a lot of material about the relation between rolling resistance and fuel consumption to clarify the real connection between them and to turn rolling resistance into a quantitative economic factor. The influence potential can be described by the fact that a change of 1 % in fuel consumption corresponds a price change (without tax) of 6 M€ in lorry traffic and 5 M€ in car traffic (with tax respectively 14/17 M€).

Pavement evenness is usually evaluated by inventory measurements and also by pavement quality assessment with the international IRI-value (International Roughness Index). IRI is mainly regarded as a value describing driving comfort and its usefulness as an indicator of rolling resistance (and fuel consumption) has been assessed as well. The surface profile of pavements is internationally described by micro, macro and mega roughness and by unevenness (=IRI). The wave lengths are 0–0.5 mm (micro roughness), 0.5–5 mm (macro roughness), 5–500 mm (mega roughness) and 0.5–50 m (IRI), values above this are geometry.

Rolling resistance is affected by many factors connected with tyres and environment, such as tyre pressure, temperatures of tyre and air, speed, tyre properties. Their effects on rolling resistance must be known in order to decide the effect of pavement surface on rolling resistance.

Other factors affecting rolling resistance are tyre properties, driving conditions and quality of pavement. Tyre properties are an important factor because the manufacturer has a great deal of influence. Reducing rolling resistance has been a central factor in tyre development. Results have been very good and rolling resistance properties of tyres at present – both for lorries and cars – have improved immensely.

As to driving conditions, speed, tyre temperature and air temperature form a certain balance. In principle, in standardized conditions an increase in speed increases the rolling resistance coefficient. On the other hand, an increase of tyre pressure reduces the rolling resistance.

The following connection between rolling resistance and fuel consumption can be determined: a change of 10 % in rolling resistance affects fuel con-

sumption by 1–4 %, average for cars is 2 % and 2,5 % for lorries. Percentages of different pavement roughnesses affecting rolling resistance are: micro roughness 2-3 %, macro roughness 10 %, mega roughness 12 % and unevenness 10 %.

The study also presents some new results with no existing theoretical base. Thus this study has presented a new hypothesis about the effect of bearing capacity on rolling resistance and the mechanism behind it – in the reference literature there are measuring results but no theoretical evaluation to back up them. In addition, recommendations are given for both new use of results of the present evenness measurement methods and a new description value for road evenness PSD (Power Spectral Density) that describes how road surface construction affects different cost groups.



## **ESIPUHE**

Tiehallinto käynnisti vuonna 2003 osana Tiehallinnon väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelmaa (VOH) projektin, jossa alettiin selvittää haittoja, joita päällysteen epätasaisuus aiheuttaa liikenteelle.

Osaselvityksessä VOH 2.3 (Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen) on koottu yhteen kirjallisuuden perusteella se tietämys, mikä kyseiseen aihepiiriin on viimeisten kymmenen vuoden aikana tullut.

Selvityksen teettäjänä on toiminut DI Pertti Virtala Tiehallinnosta ja tekijänä tekn.tri Anssi Lampinen, AL-Engineering Oy:stä

Helsinki, joulukuu 2004

Tiehallinto  
Suunnittelu

## Sisältö

1	JOHDANTO	13
2	TIEN PITUUSSUUNTAINEN EPÄTASAISUUS	14
2.1	Pinnan tekstuuri ja sen käsitteet	14
2.2	Pituussuuntaisesta epätasaisuudesta laskettavat suureet	14
2.2.1	Yleistä	14
2.2.2	Mikro-, makro- ja megakarkeus	17
2.2.3	IRI ja QI	18
2.2.4	PSD ( Power Spectral Density)	19
3	VIERINTÄVASTUS	23
3.1	Käsitteet	23
3.1.1	Vierintävastus verrattuna muihin ajovastuksiin	23
3.1.2	Päällysteen pintaprofiili	25
4	PÄÄLLYSTEEN PITUUSPROFIILIN VAIKUTUS VIERINTÄVASTUKSEEN	30
4.1.1	Mikrokarkeus	30
4.1.2	Makrokarkeus ja profiilisyvyys	30
4.1.3	Epätasaisuus IRI	32
4.1.4	Makro- ja megakarkeuden sekä epätasaisuuden yhteisvaikutus	34
4.1.5	Yhteenveto päällysteen pituusprofiilin vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen (ja vierintävastukseen)	35
4.2	Vierintävastukseen vaikuttavat muut kuin päällystetekijät	37
4.2.1	Yleistä	37
4.2.2	Renkaan ominaisuudet	37
4.2.3	Ajonopeus	39
4.2.4	Renkaan lämpötila	43
4.2.5	Renkaan ilmanpaine	44
4.3	Energiahäviöt jousituksessa	44
4.4	Päällysrakenteen kantavuus (stiffness)	47
5	POLTTOAINEENKULUTUS	51
5.1	Vierintävastuksen ja polttoainekulutuksen suhde	51
5.2	Polttoainekulutukseen vaikuttavia muuttujia	52
5.2.1	Polttoainekulutuksen koostumus	52
5.2.2	Renkaan ominaisuudet	53
6	VIERINTÄVASTUKSEN MITTAUSMENETELMÄT	54
6.1	Mittausmenetelmiä koskevat yleiset huomiot	54
6.2	Laboratoriokokeet	54
6.3	Kenttäkokeet tiellä	55

7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	57
7.1	Päällysteen pinnan kuvaaminen ja mittaaminen	57
7.2	Vierintävastuksen taloudelliset vaikutukset	58
7.3	Vierintävastus ja päällysteen pituusprofiili	58
7.4	Päällystetekijöiden vaikutuspotentiaali Suomessa	59
7.5	Kantavuuden vaikutus vierintävastukseen	60
7.6	Vierintävastukseen vaikuttavat muut tekijät	60
7.7	Suositus mittausmenetelmistä	61
8	KIRJALLISUUSLUETTELO	63
9	KUVALUETTELO	65

## 1 JOHDANTO

Tienpinnan ominaisuuksilla on hyvin moninaiset vaikutukset sekä tienpitäjään että tienkäyttäjään. Perinteisesti nämä vaikutukset voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- ajotalous
- ajoturvallisuus
- ajomukavuus

Ajotalouteen vaikuttavat tekijät ryhmitellään edelleen ajo- (ajoneuvo- ja aika-) ja onnettomuuskustannuksiksi. Tien pinnan epätasaisuuden aiheuttamat kustannukset kohdistuvat ensisijaisesti tienkäyttäjään ajoneuvon polttoaineta-  
louden sekä kulumisen (ylläpitohuollon ja korjaustarpeen) ja aikakustannus-  
ten muodossa.

Tienpitäjälle tienpinnan epätasaisuutena esiintyvä huono kunto aiheuttaa lisääntyviä tienpidon kustannuksia siksi, että tierakenteen rasitus lisääntyy dynaamisten pyöräkuormien muodossa aiheuttaen siten tien nopeampaa kuormituskestävyyden alenemista.

Tämän raportin tarkoituksena on tarkastella tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutuksia vierintävastukseen ja siitä johtuviin polttoainekulutuksen muutoksiin koti- ja ulkomaisista tutkimuksista saatujen kirjallisuustietojen ja niiden kriittisen tarkastelun perusteella. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty tien geometria alkaen n. 50 m aallonpituudesta. Tarkoituksena on erityisesti selvittää sitä, missä määrin nykyisin käytössä olevaa tien pituussuuntaisen epätasaisuuden kuvaamisessa käytettyä IRI-lukua voidaan käyttää vierintävastuksen suuruuden ja sen taloudellisen merkityksen arvioinnissa.

Tämän lisäksi tehdään ehdotus mittausmenetelmistä, joilla edelleen voidaan parantaa saatavan tiedon tasoa ottaen huomioon Suomessa nykyisin käytössä olevat mittauslaitteet ja niiden nykyään keräämät muuttujat ja mahdolliset uudet tienpintaa em. tarkoituksessa kuvaavat muuttujat.

Potentiaalisia polttonesteen säästömahdollisuuksia kuvaavat seuraavat arviot /29/: Dieselpolttoaineenkulutus Suomessa oli v. 2002 noin 1 860 miljoonaa litraa, josta bussit ja kuorma-autot käyttävät noin 80 %. Jokainen 1 % säästö raskaan kaluston polttoainekulutuksessa merkitsisi siten noin 6 M€ säästöä verottomassa hinnassa ja 14 M€ säästöä verollisessa hinnassa.

Henkilöautoliikenteen osalta vastaavat arviot olivat polttoaineenkulutuksen osalta 1 720 milj. litraa ja säästöt siten 1 % polttoaineenkulutuksen osalta noin 5/17 M€ verottomassa/verollisessa hinnassa.

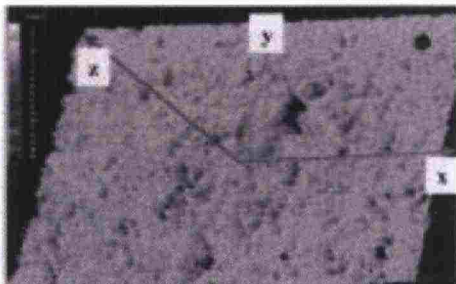
Yhteensä siis ajoneuvojen vierintävastusta alentamalla saavutettu polttoainekustannusten vähentyminen merkitsisi n. 11/31 M€:n säästöä yhtä prosenttiyksikköä kohti. Kysymyksessä on siten merkittävä säästömahdollisuus, joka on aikaansaataavissa päällysteiden ja ajoneuvojen vierintävastusta pienentämällä.



## 2 TIEN PITUUSSUUNTAINEN EPÄTASAISUUS

### 2.1 Pinnan tekstuuri ja sen käsitteet

Päällysteen pinta on 3-ulotteinen (kuva 1) muodostuen asfalttipäällysteiden ollessa kysymyksessä kiviainesrakeista, bitumista ja tyhjätlasta. Valmistumishetkellä sen voisi kuvitella olevan homogeeninen pituus- ja poikkisuunnassa, mutta mm. valmistusteknisistä (levitys ja jyräys pituussuunnassa) seikoista johtuen pituus- ja poikkiprofileissa on eroja. Erot kasvavat liikenteen vaikutuksesta siten, että niistä osittain puhutaan eri käsitteillä, kuten urasyvyys, joka on tyypillinen poikkiprofiilin käsite, kun taas tekstuuri on yleiskäsite, joskin eniten käytössä pituusprofiilin määrittämisessä.



Kuva 1. Päällysteen pinnan 3-ulotteinen profiili /2/

Päällysteen pinnasta määritetään tyypillisesti kahdenlaisia profiileja: pituus- ja poikkiprofiileja, vaikkakin ideaalisin tapa olisi kuvata pintaa 3-ulotteisena. Lähinnä mittaustekniset syyt estävät tämän käytännön normaaleissa "massa"-mittauksissa. Mitattavan pituusprofiilin paikka riippuu sovelluksen tarkoituksesta, mutta esim. tässä raportissa käsiteltäessä sen vaikutuksia ajokustannuksiin on tarkoituksenmukaista mitata se ajoneuvojen käyttämältä alueelta eli ajoura(i)sta.

### 2.2 Pituussuuntaisesta epätasaisuudesta laskettavat suureet

#### 2.2.1 Yleistä

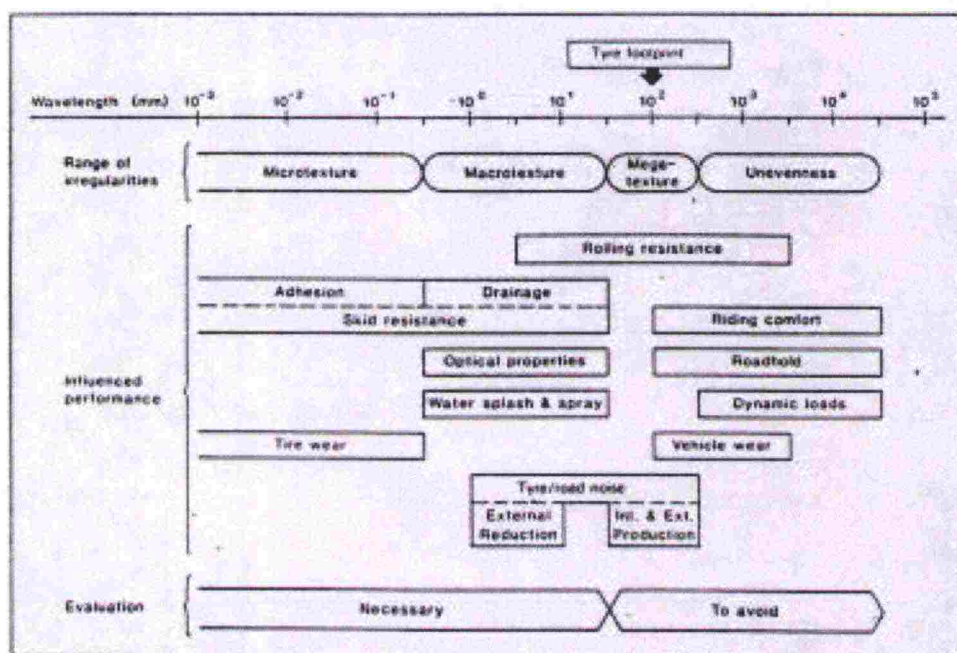
Tien ja päällysteen ominaisuudet vaikuttavat hyvin monella tavalla sekä tienkäyttäjään että tienpitäjään. Näitä vaikutuksia ovat:

- Vierintävastus
- Kitkaominaisuudet
- Ajomukavuus
- Optiset ominaisuudet, valonheijastuminen jne.
- Veden roiskuminen ja sumuuntuminen
- Renkaiden kuluminen
- Dynaamiset rasitukset
- Rengas- ja päällystemelu, ajoneuvon sisällä ja ympäristössä
- Tiekosketus (roadhold)



Osalla em. muuttujista on tienkäyttäjää ajatellen positiivinen, toivottava ominaisuus ja vaikutus ja toisia puolestaan tulisi välttää. Kansainvälisen tutkimustoiminnan ja yhteistyön seurauksena on v. 1987 ensi kertaa esitetty tien pitkittäisen epätasaisuuden ja em. ominaisuuksien välisiä yhteyksiä (kuva 2). Samalla on myös ensimmäistä kertaa esitetty pitkittäisprofiilin jako eri aallonpituusalueiden perusteella neljään luokkaan:

Nimitys	Aallonpituus, mm	Amplitudi, mm
Mikrokarkeus	0 - 0,5	0.001 - 0.5
Makrokarkeus	0,5 - 50	0.1 - 20
Megakarkeus	50 - 500	0.1 - 50
Epätasaisuus	500 - 50000 (0,5 - 50 m)	



Kuva 2. Pituussuuntaisen epätasaisuuden luokittelu ja vaikutukset /3/

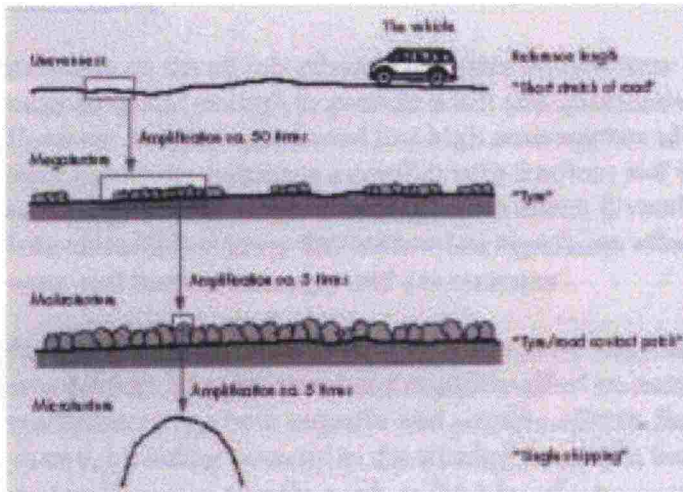
Kuvassa 2 on esitetty eräänlaisena nyrkkisääntönä, että mikro- ja makrokarkeus ovat välttämättömiä erityisesti kitkan ja optisten ominaisuuksien takia, vaikka niillä on epäsuotuisiakin vaikutuksia (renkaiden kuluminen, veden sumuuntuminen ja roiskuminen). Sen sijaan megakarkeudella ja epätasaisuudella on vain epäsuotuisia vaikutuksia.

Vierintävastukseen vaikuttavat sekä makro- ja megakarkeus että epätasaisuus (IRI). Kuvassa ei sen sijaan esitetä eri karkeus- ja epätasaisuusluokkien vaikutuksen suuruutta tai suuruusluokkaa.

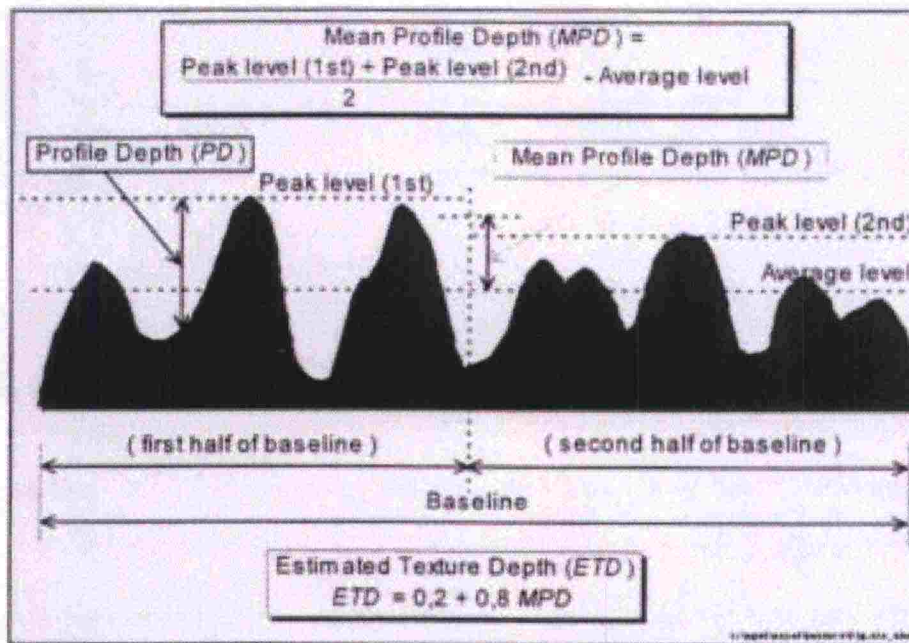
Vierintävastukseen vaikuttavia aallonpituusalueita ovat pääasiassa makro- megakarkeus sekä epätasaisuuden – IRI – alkuosa n. 0,5–5 m.

Mikro- ja makrokarkeuden muotoa kuvaavia pinnan terävyyttä ja avoimuutta ei sen sijaan ole mittaamenetelmissä otettu huomioon muuten kuin verbaa-  
lisesti puhumalla esim. "avoimesta" asfalttipäällysteestä.

Päällysteen pintaprofiiliin jaottelusta saa hyvän käsityksen kuvasta 3, jossa tienpintaa on suurennettu seuraaviin skaaloihin: epätasaisuus > megakarkeus > makrokarkeus > mikrokarak-  
teus ja kuvasta 4, jossa on todellinen mittaus-  
tulos 100 mm matkalla n. 1 mm askelpituudella.



Kuva 3. Epätasaisuuden ja karkeuden eri lajit kaavamaisesti esitettynä /4/



Kuva 4. Päällysteen makrokarkeus ja siitä mitattu MPD (Mean Profile  
Depth=Profiilin keskisyvyys) mitattuna laserinstrumentilla 0,4 mm välein /4/.



Profiilin keskisyvyys MPD määritetään seuraavasti: Profilometrillä mitattu 10 cm osuus jaetaan ensin kahteen 5 cm osuuteen, joilta otetaan huomioon molempien huippuarvojen keskiarvo. Näin saadusta keskiarvosta vähennetään mitatun (Profile Depth) 10 cm profiilin keskisyvyys (Average level).

Toinen tapa määrittää karkeutta on ilmoittaa ns. Estimoitu karkeusarvo (ETD), joka saadaan laskennallisesti suoraan MPD:stä tai mitattuna ns. Sand Patch-menetelmällä.

### 2.2.2 Mikro-, makro- ja megakarkeus

Mikrokarkeuden määrittämiseen ei ole olemassa käytännön mittausmenetelmää lyhyen aallonpituuden (0–0,5 mm) vuoksi. Tarvittaessa se voitaisiin mitata esim. laserinstrumentilla, jonka mittauspään ”täplän” halkaisija olisi n. 0,01 mm ja askelväli samoin n. 0,01 mm.

Makrokarkeus voidaan määrittää seuraavilla menetelmillä: a) hiekkavolymetrillä eli ns. Sand Patch-menetelmällä, b) etäisyysmittaukseen perustuvalla menetelmällä, kuten laser-kolmiomittauksella (nykyään tavallisin menetelmä) tai c) mekaanisella mittapuikkomenetelmällä.

Megakarkeus määritetään etäisyysmittaukseen perustuvalla menetelmällä, nykyään lähes aina laser-kolmiomittauksella.

Mittaustulokset ilmoitetaan seuraavilla tavoilla:

#### **RMS (Root Mean Square)**

RMS tulee alun perin sähkötekniikasta, jossa sillä mitataan jännitevaihtelujen tehollisarvoja. Esim. siniaaltomuotoisen käyrän, jonka amplitudi on 1 (V, mm tms.),  $RMS=0,7$  (V, mm, tms.). Sen sijaan vastaavan ”kanttiaallon” RMS on 1,0 (V, mm, tms.).

RMS-arvoon vaikuttaa havaintovälin pituus, joten se on tunnettava verrattaessa eri arvoja keskenään. RMS kasvaa askelväliä pienennettäessä.

*RMS-arvoa käytettäessä on tunnettava myös aallonpituusalue, jolta tunnusluku lasketaan. Jotta RMS-arvot olisivat keskenään vertailukelpoisia on siis tunnettava sekä mittaustiheys (askelväli) että tarkasteltava aallonpituusalue (m).*

#### **MPD (Mean Profile Depth, Profiilin keskisyvyys)**

Esimerkki MPD:n laskennasta makrokarkeudelle on esitetty kuvassa 4. Se on RMS:n ohella tavallisin nykyään käytetyistä makrotekstuurin tunnusluvuista.

MPD:stä on olemassa ISO:n normi /5/.

#### **Sand Patch Test**

ETD (Estimated Texture Depth) määritetään levittämällä  $50\text{ cm}^3$  hienoa tasarakeista hiekkaa mitattavalle päällysteelle pyöreäksi pinnaksi siten, että se

peittää pinnan epätasaisuudet. Levitetyn määrän ja mitatun pinta-alan perusteella saadaan tulokseksi keskimääräinen tekstuurisyvyys.

ETD:llä ja MPD:llä on seuraava erittäin hyvä riippuvuus:

$$\text{ETD} = 0.2 + 0.8 \cdot \text{MPD} / 5 \quad (1)$$

### 2.2.3 IRI ja QI

IRI:n määrittämiseen ja mittaamiseen liittyvät keskeiset elementit on esitetty kuvassa 5. IRIä luonnehtivat seuraavat asiat:

Tyypiajoneuvosta ns. ¼-ajoneuvomallista "Golden Car" on määritetty sen keskeiset parametrit, jotka tekevät siitä matemaattisesti yksikäsitteisen. Parametrit vastaavat vanhaa "amerikanrautaa".

IRI (tulostieto) määritetään jousittamattoman massan (akseli) ja jousitetun massan (rungon) välisen liikkeen summana ajettaessa tien pituusprofiilia pitkin (syöttötieto).

IRI:n tunnusluku mm/m on toisaalta laadultaan kaltevuusmuuttuja, sillä se voidaan laskea mitatun profiilin peräkkäisten profiilipisteiden korkeuserojen eli kaltevuusmuutoksien  $dz/dx$  avulla.

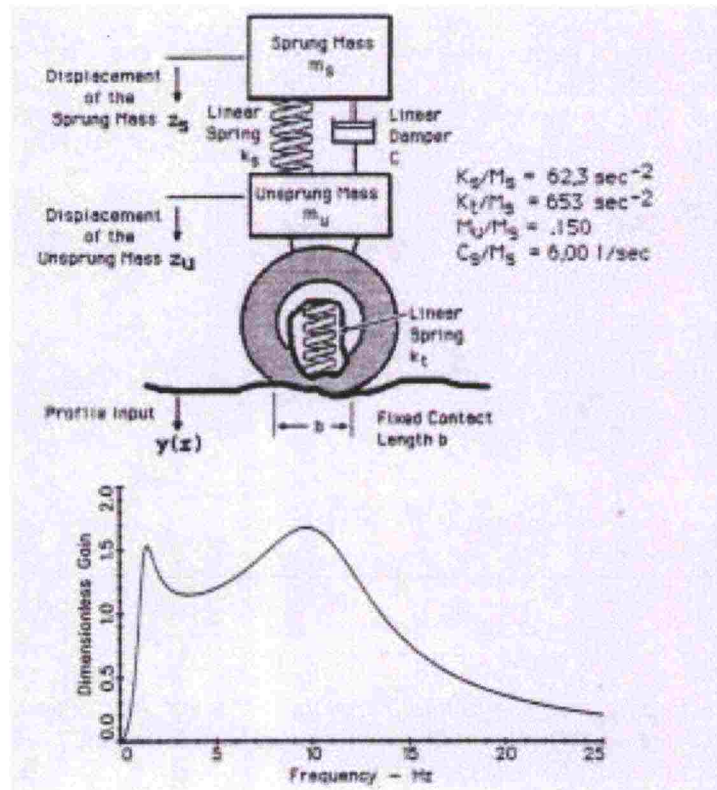
Esim. IRI 1 tarkoittaa siten sitä, että ajettaessa rungon ja akselin välinen liike on vertikaalisuunnassa 1 mm 1 metrin matkalla (tai 100 mm/100 m tai 1 m/1 km).

Avaruudessa rungon (=matkustajan) liikerata on suurempi pystysuunnassa johtuen renkaan joustosta.

Ajoneuvon jousitusominaisuudet vaikuttavat siihen, että rungon ja akselin välisen liikkeen suuruus vaihtelee verrattuna todellisen epätasaisuuden pysymyksenmuutokseen siten, että esim. n. 1,5 ja 10 Hz taajuudella esiintyvät epätasaisuudet korostuvat voimakkaasti ja toisaalta n. 0,5 Hz alittavat ja n. 25 Hz ylittävät taajuudet vaikuttavat IRI:n laskentaan hyvin vähän.

Standardi "ajo"nopeus profiililla on 80 km/h eli 22,22 m/s vastaten edellä esitettyjä taajuuksia seuraavasti: 0,5 Hz=44,44 m, 1,5 Hz=5,56 m, 10 Hz=2,22 m ja 25 Hz=0,89 m.

IRI:n määrittelyalue on 0,5–25 m (näkee myös arvoja 30 ja 50 m, mutta ko. alueella ei varsinaiseen mittaustulokseen ole sanottavaa vaikutusta).



Kuva 5. IRI:n mittauksessa käytetyn 1/4-ajoneuvomallin parametrit ja tien epätasaisuuteen perustuva ns. siirtofunktio (dimensioton kerroin) /6/.

Kirjallisuudessa näkyy myös muita tunnuslukuja. Niistä useimmin esiintyvä on ehkä QI, jonka yhteys IRI:in on seuraava:  $QI = n \cdot 13 \cdot IRI$  (2)

## 2.2.4 PSD ( Power Spectral Density)

Sana "power" PSD:ssä tulee sen varhaisesta käytöstä sähkötekniikassa, jossa sitä käytettiin kuvaamaan jännitteen vaihtelua vastuksessa eri taajuuksilla. Teiden tasaisuusmittaussovellutuksessa sillä ei siis ole mitään tekemistä "voiman" kanssa!

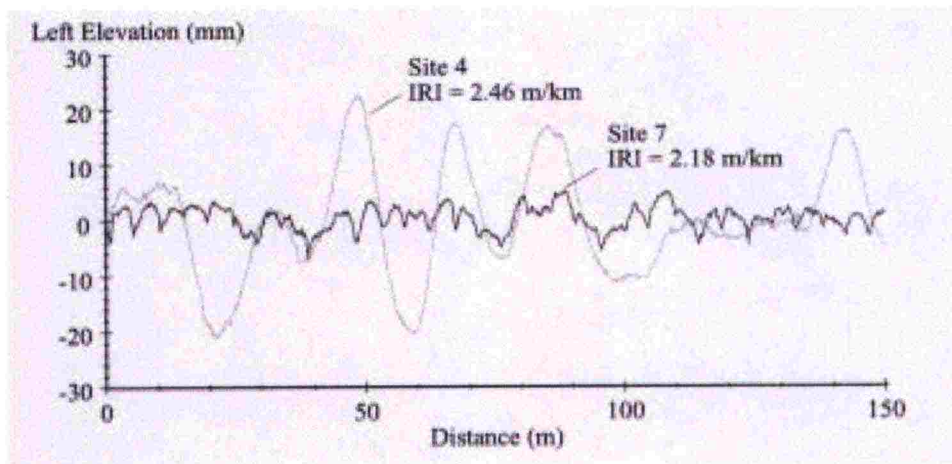
PSD:tä käytetään kuvaamaan tien pituussuuntaisten epätasaisuuksien jakautumista esim. taajuuden (1/s) tai aaltoluvun (aaltoa/m) perusteella. PSD:n "voima" piilee siinä, että se kertoo parhaiten tietyn tien epätasaisuuden luonteen, ts. sen millaisista siniaalloista (=epätasaisuuksista) ko. tie koostuu ja kuinka haitallisia ne ovat.

PSD voidaan laskea profiilista mitatuille pisteiden z-koordinaateille, kaltevuusmuutoksille ( $dz/dx$ ), kiihtyvyydelle jne.

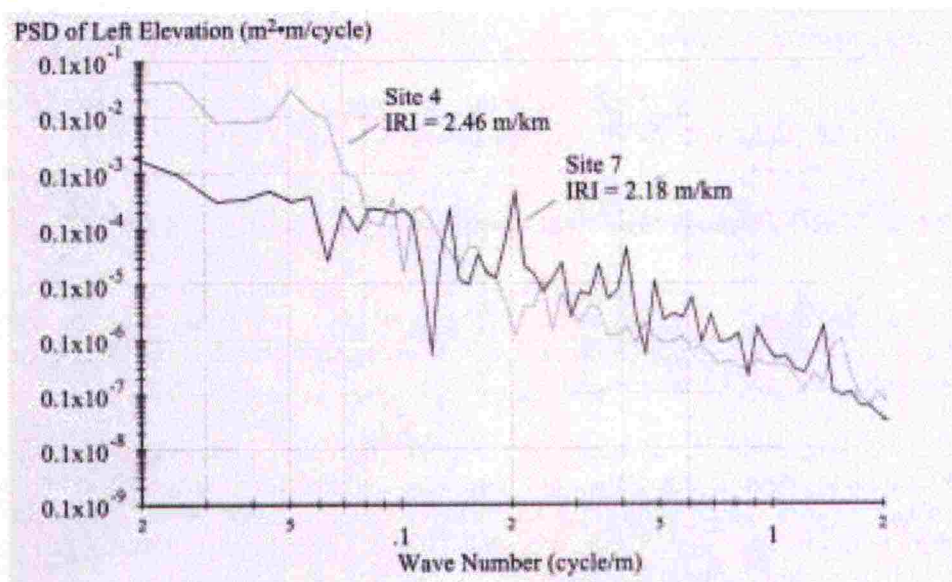
Tavallisimmin tarkastellaan geometrista profiilia, jossa PSD:n määre on  $m^2 \cdot m/aaltomäärä$  vaaka-akselin yksikön ollessa aaltoluku (aaltoa/m).



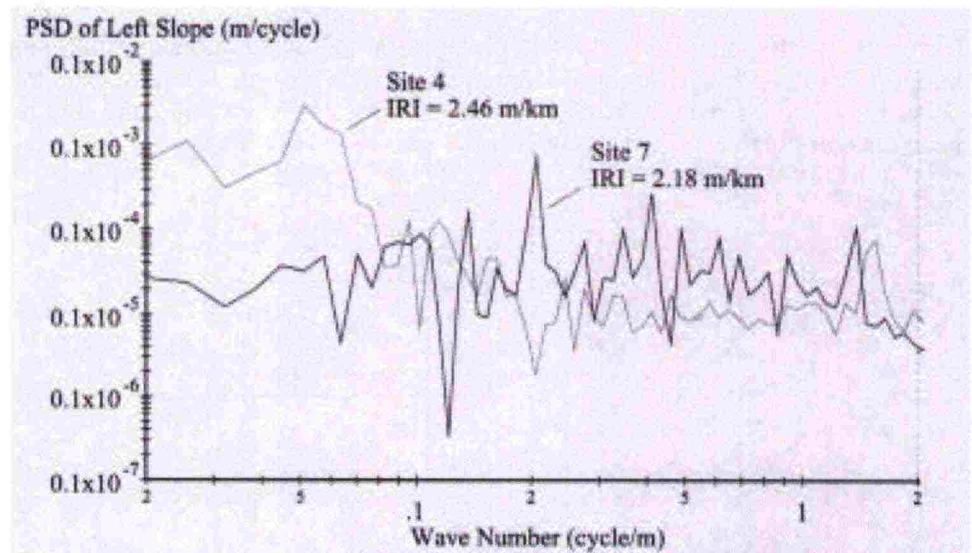
PSD:n ja IRI:n välistä yhteyttä selvittää ehkä parhaiten seuraavissa kuvissa esitetty esimerkki kahdesta tiekohteesta, joilla on lähes sama IRI, mutta PSD:t eroavat suuresti kertoen myös syyn siihen.



Kuva 6. Kaksi todellista pituusprofiilia ja niistä lasketut IRI-arvot, jotka teiden erilaisista profiileista (Site 4 on betonipäällysteinen ja Site 7 on asfalttipäällysteinen tie) huolimatta on käytännöllisesti katsoen sama /7/.



Kuva 7. Edellisen kuvan esimerkin perusteella laskettu pituusprofiilin pystysiirtymän PSD /7/.



Kuva 8. Kaltevuuden ja aaltoluvun perusteella kuvan 6 aineistosta laskettu PSD /7/.

Kuvissa käytettyjen yksikköjen selventämiseksi esitetään seuraavassa käytetyt merkinnät:

$$f = V/\lambda = V \cdot v$$

(3)

$$f = \text{taajuus} = \text{cycle/s} = 1/\text{s}$$

$$V = \text{nopeus} = \text{m/s}$$

$$\lambda = \text{aallonpituus} = \text{m/cycle} = \text{m}$$

$$v = \text{aaltoluku} = 1/\text{m} = \text{cycle/m} = 1/\lambda$$

Edellä olevassa esimerkissä Site 4 on betonipäällyste, jolle tyypillistä on pitkät aallot ja suuret amplitudit ja vastaavasti Site 7:lle (asfalttipäällyste) tyypillistä on lyhytaaltainen epätasaisuus huomattavasti pienemmin amplitudein.

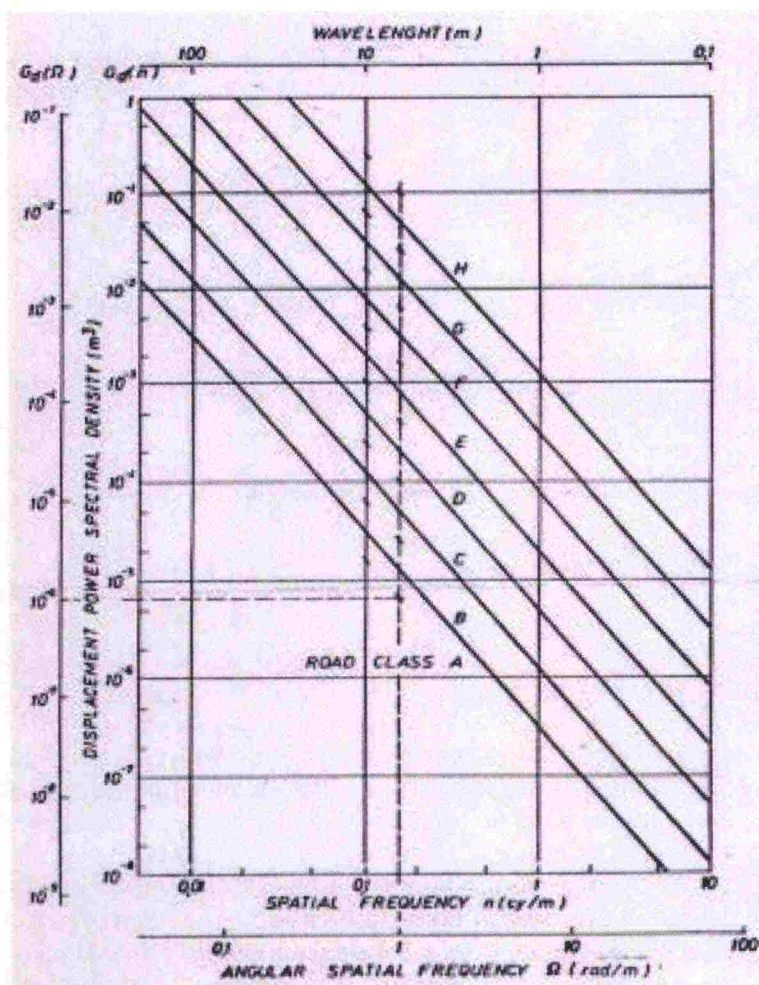
Sekä ajomukavuus että dynaaminen rasitus ko. kohteilla eroavat huomattavasti toisistaan, mitä IRI ei kuitenkaan paljasta. PSD-kuvaajien lähempi tarkastelu osoittaa kuitenkin selvästi minkälaisista aallonpituuksista ja amplitudeista näiden teiden epätasaisuudet koostuvat – ja siten niiden perusteella voidaan paremmin arvioida niiden ominaisuuksia.

Kun tunnetaan päällysteen pituusprofiili myös (mikro)-, makro- ja megakarkeuden osalta (nämä aallonpituusalueet eivät sisälly IRI:n epätasaisuusalueeseen) saadaan PSD:n avulla "täydellinen" informaatio tien ja päällysteen luonteesta. Tarkasteluja voidaan tehdä usealla muullakin muuttujakriteerillä, kuten pystynopeudella, pystykiihtyvyydellä jne. Mikrokarkeutta lukuun ottamatta on tien pituusprofiili helposti nykyaikaisin menetelmin mitattavissa ja tallennettavissa.

PSD tarjoaa parhaan mahdollisuuden tien pituussuuntaisen tekstuurin ja profiilin vaikutusten selvittämiseksi ja ymmärtämiseksi, sillä siinä esiintyvät kaikki taajuudet/aallonpituusalueet ja niiden vaikutus. Erityisesti PSD auttaa ymmärtämään sen, mistä tien epätasaisuus aiheutuu – pitkistä vai lyhyistä aalloista – mitä IRI ei kerro.



Esimerkkinä tavasta luokitella tiet päällysteen pituussuuntaisen epätasaisuuden PSD:n (Power Spectral Density) avulla on esitetty kuvassa 9. Siinä on vaak-akselilla esitetty sekä aallonpituus että vastaava aaltoluku ja pystyakselilla on pystyprofiilin G-funktio.



Kuva 9. Esimerkki teiden luokittelusta päällysteiden pystysuuntaisen epätasaisuuden Power Spectral Density (PSD) avulla /8/.

Luokka A edustaa parasta tasaisuutta ja vastaavasti luokka H edustaa huonointa. Ideana on sijoittaa esim. kuvassa 7 esitetyt PSD-spektrit käyrästöön ja tarkastella niiden sijoittumista eri luokkiin. Kuvan 7 esimerkkiaineisto sijoittuisi luokkaan B.

Sijoittelun kannalta on ratkaistava, missä pisteessä (aallonpituus tai taajuus) tarkastelu tehdään, sillä kohteen PSD-käyrä voi ylittää kahden luokan rajan ja toisaalta sijoittua eri osiltaan – erityisesti pitkillä aalloilla/lyhyillä aallonpituuksilla – eri luokkiin. Toisaalta voitaisiin käyttää myös eri tarkastelupisteitä eri tarkoituksiin: ajomukavuus, -turvallisuus, -kustannukset jne. Tyypillistä teiden epätasaisuudelle on kuitenkin se, että niiden spektrit noudattavat em. käyrästön kaltevuutta ja suuret erot johtuvat nimenomaan täysin erityyppisistä epätasaisuuksista, kuten betoni/asfalttipäällyste-esimerkki osoittaa.

### 3 VIERINTÄVASTUS

#### 3.1 Käsitteet

Vierintävastuksesta puhuttaessa on erotettava kaksi käsitettä:

a. Vierintävastusvoima  $F_r$ , joka voidaan esittää mm. seuraavalla tavalla:

$$F_r = M_{\text{ajoneuvo}} \cdot g (R_0 + R_1 \cdot V + R_2 \cdot V^2 + R_3 \cdot V^3) V \quad (4)$$

jossa

$F_r$	on ajoneuvon kokonaisvierintävastusvoima, N
$M_{\text{ajoneuvo}}$	on ajoneuvon kokonaismassa, kg
$g$	on maan vetovoiman kiihtyvyys
$R_0, 1, 2, 3$	ovat vierintävastuskertoimia
$V$	on ajoneuvon nopeus

b. Vierintävastuskerroin  $C_r$ , joka esitetään tavallisimmin lukuarvona N/tonni.

Useimmiten tulee kysymykseen vierintävastuskerroin  $C_r$ .

Vierintävastuksen yksikkö on N tai J/m.

Vierintävastuksen tavallisin esittämistapa on ilmoittaa ns. vierintävastuskoeficientti (kerroin)  $C_r$ , joka on yhdistetty renkaan normaalivoimaan seuraavasti:  $C_r = F(\text{pyöräkuorma})/\text{vierintävastus}$ . Sen suuruus on henkilöautoilla n. 0,01–0,015 ja kuorma-autoilla vastaavasti n. 0,005–0,010.

#### 3.1.1 Vierintävastus verrattuna muihin ajovastuksiin

Ajoneuvon renkaan vierintävastus tienpinnalla liikuttaessa voidaan jakaa kolmeen osaan:

- Vierintävastus ideaalitasaisella pinnalla
- Tienpinnan karkeuden aiheuttamat energiahäviöt renkaassa
- Energiahäviöt ajoneuvon jousitusjärjestelmässä tien epätasaisuuden aiheuttaman jousitetun ja jousittamattoman massan keskinäisen liikkeen vuoksi

Pääasialliset vierintävastukseen vaikuttavat tekijät voidaan puolestaan jakaa neljään pääryhmään:

- Tien pintaominaisuudet (mikro-, makro- ja megakarkeus sekä epätasaisuus)
- Renkaan ominaisuudet (rakenne- ja materiaalitekijät)
- Ympäristöolosuhteet (lämpötila, pinnan tila kuiva/vesi/lumi/ jää)
- Toimintaolosuhteet (nopeus, kuormitus, rengaspaine, ohjausgeometria, luisto)

Tässä selvityksessä keskitytään päällysteen pinnan tekstuuriin ja epätasaisuuden vaikutukseen vierintävastukseen ja osittain vierintävastuksen vaikutuksiin ajoneuvon polttoainetaloudessa.



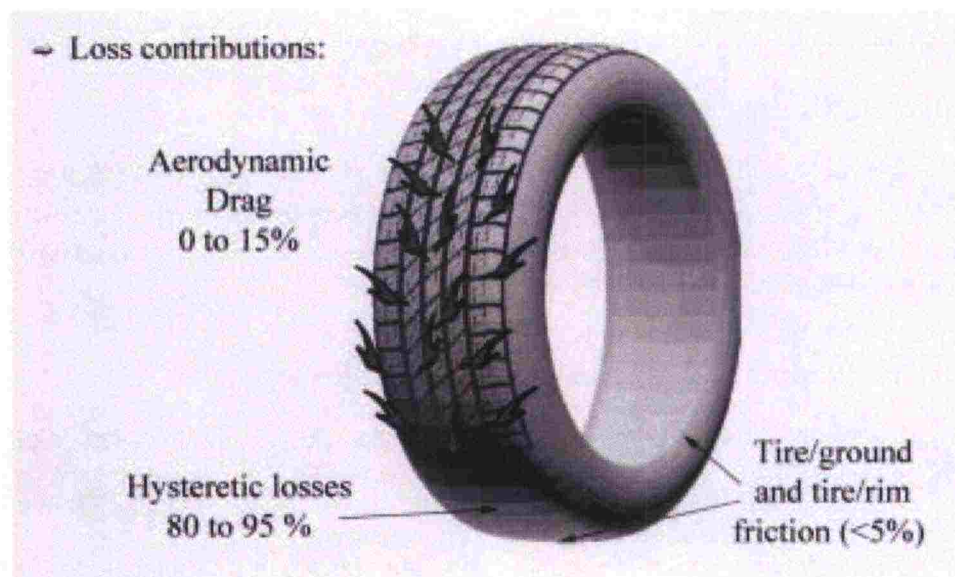
Vierintävastukseen suuruuteen voidaan vaikuttaa kahtaalta: toisaalta ajoneuvo- ja rengasteknisin muuttujin ja toisaalta päällyste- ja tieteknisin muuttujin (tien tekstuuri, epätasaisuus, geometria, kantavuus, pinnan laatu, sääolosuhteiden vaikutus pinnan laatuun (vesi, lumi) jne.

Ajoneuvo- ja rengasteknisiä muuttujia ovat mm:

- Renkaan massa
- Kumin koostumus
- Renkaan ilmanpaine
- Nopeus
- Ilman lämpötila/renkaan lämpötila
- Käytetty vääntö vedossa (Drive torque)
- Ohjauskulmat (aurauss, camber, caster)

Edellä mainituista muuttujista renkaan ilmanpaineella, lämpötilalla, nopeudella ja päällysteen ominaisuuksilla on myös keskinäisiä riippuvuuksia.

Renkaan vierintävastus koostuu seuraavista muuttujista (kuva 10):



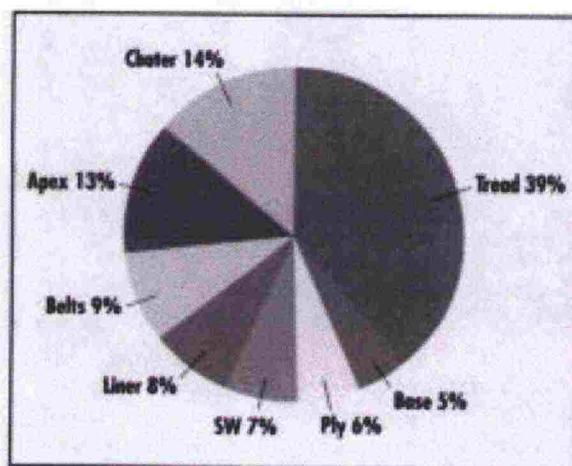
Kuva 10. Renkaan vierintävastuksen osakomponentit /9/.

Yleisesti vierintävastuksella tarkoitetaan energiahäviöitä renkaan ja päällysteen kontaktipinnassa.

Kuten edellä voidaan havaita, niin pääasiallisimmat vierintävastukseen (energiähäviöihin) vaikuttavat tekijät ovat hysteresishäviöt renkaan ja päällysteen kontaktipinnassa (80–95 %). Pieni osa häviöistä aiheutuu renkaan sisäisestä ja ulkoisesta (rengas/päällyste) kitkasta (<5 %) ja renkaan ilmanvastuksesta (ajoneuvorakennetekijä).

Renkaan rakenneteknisin seikoin voidaan vierintävastukseen vaikuttaa myös monella tavalla, kuten kuvassa 11 on esitetty. Renkaan vierintävastuksen pienentäminen onkin eräs rengastehtaiden tärkeimpiä tutkimus- ja kehityssaiheita.





Kuva 11. Rengasteknisten muuttujien vaikutuksia renkaan vierintävastukseen /10/.

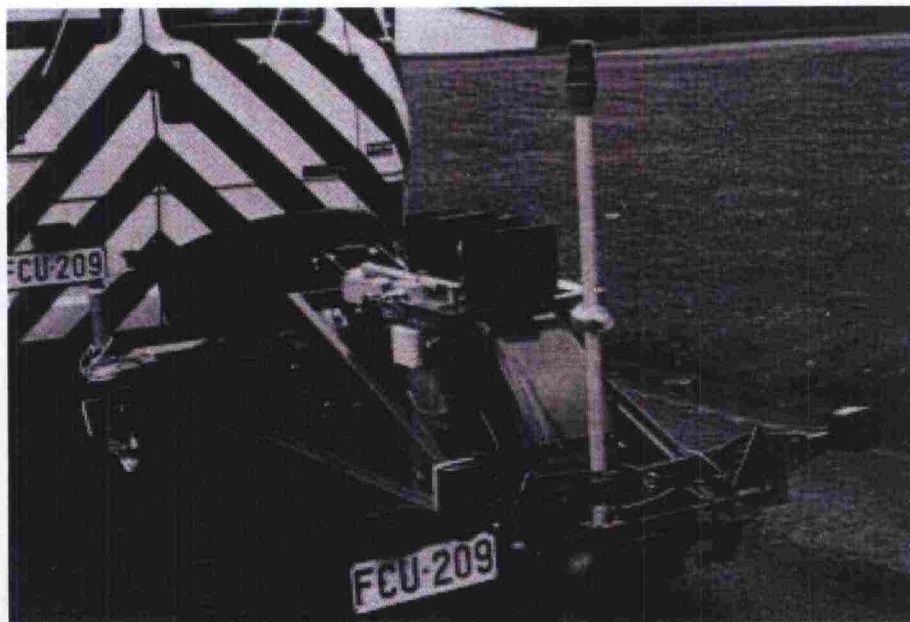
Kuten havaitaan renkaan kulutuspinna vaikuttaa ratkaisevasti (39 %) sen vierintävastukseen, mutta muutkin renkaan osat näyttelevät suurta osaa.

### 3.1.2 Päällysteen pintaprofiili

#### 3.1.2.1 Taustaa

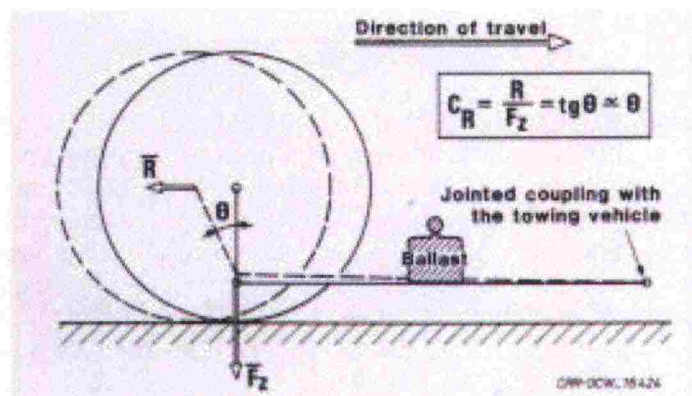
Haluttaessa tutkia vierintävastusta kontrolloiduissa ja mahdollisimman vähän epäoleellisia muuttujia sisältävissä olosuhteissa esiin nousee kysymys koe-menettelmästä. Tavanomaisimpia ovat todellisilla ajoneuvoilla tehdyt vierintäkokeet ("coast down"), jossa mitataan ajoneuvon nopeuden hidastumista rullatessa – tuloksena saatavasta nopeus/aika-käyrästä voidaan laskea vierintävastus. Ongelmia tällaiseen mittaukseen aiheuttavat olosuhteiden (pinnan kaltevuus, tuulennopeus ja -suunta, ilmanpaine jne.) vaikea vakiointi ja mahdolliset vaihtelut eri ajokertojen välillä. Se on kuitenkin tavanomaisin ja käytetyin menetelmä. Vierintävastuksen mittaamenetelmiä esitellään tarkemmin informaatioluonteisesti jäljempänä kappaleessa 5.

Toisen tärkeän ryhmän muodostavat tätä tarkoitusta varten suunnitellut ja rakennetut mittausrakenteet, joissa mahdollisimman luonnon mukaisesti jäljitellään rengasta ja/tai neljännesajoneuvoa ja siihen kohdistuvia voimia, kun samalla voidaan vähentää muita muuttujia. Hyvä esimerkki tällaisesta mittarista on Belgian tietutkimuslaitoksen (CRR) rakentama "vedettävä neljännesajoneuvo", joka ulkoisesti muistuttaa vedettävää tasaisuusmittaria BPR (mm. VTT:llä käytössä ollut "pomppumittaria") (kuva 12).



Kuva 12. Belgian tietutkimuslaitoksen CRR kehittämä vierintävastuksen mittaamiseen rakennettu neljännesajoneuvo /11/.

Edellisen laitteen mittausperiaate on esitetty kaaviomaisesti kuvassa 13:



Kuva 13. Vierintävastusta mittaavan vedettävän perävaunun periaatekuva /11/.

Mittausrenkas on sileä, sen kuormitus on 3000 N ja renkaan ilmanpaine 210 kPa. Tutkijat mainitsevat, että mittauksen keskihajonta on alle 2 % ja mitaustarkkuus todelliseen vierintävastuskertoimeen verrattuna on +5 %.

Toisaalta tarvitaan tarkka tieto päällysteen karkeudesta ja profiilista. Niiden mittaamiseen käytetään yleisesti laserprofilometriä, Sand Patch-testiä ja IRI-mittaria. Ranskalaiset ja belgialaiset käyttävät ranskalaista APL-laitetta, jolla tutkitaan kolmea aaltoaluetta:  $a=2,5$  m, 10 m ja 40 m.

Ko. karkeus- ja epätasaisuusalueita voidaan käsitellä myös PSD-muodossa oktaavialueittain siten, että se kattaa alueen 2,5 mm–40 m.



### 3.1.2.2 Absoluuttisen tasainen tienpinta

Absoluuttisen tasaisella ja jäykällä tienpinnalla vierintävastukselle voidaan johtaa seuraava kaava /12/:

$$F_{ts} = (\alpha/2 \cdot R) / \delta^2, \text{ jossa} \quad (5)$$

$F_{ts}$	vierintävastus tasaisella pinnalla
$\alpha$	renkaan hysteresiskerroin (esim. 49 kN/m)
$R$	renkaan pyörintäsäde
$\delta$	renkaan staattinen painuma kuormituksessa

Renkaan vierintävastukseen sisältyy aina myös komponentti  $F_{ts}$ , joka on vakio vakio-oloissa. Kahteen viimeksi mainittuun komponenttiin  $R$  ja  $\delta$  vaikuttaa mm. ajonopeus.

### 3.1.2.3 Mikro- ja makrokarkeus ja kitka

Mikrokarkeuden suoranaista vaikutusta vierintävastukseen todellisissa tieolosuhteissa ei ole varsinaisesti tutkittu sopivien mittalaitteiden puuttumisen vuoksi. Mikrokarkeuden aallonpituusaluehan on 0–0,5 mm, joten sen mittaaminen vauhdissa on mahdotonta ja staattisestikin erittäin haastavaa.

Tienpinnan mikro- ja makrokarkeuden sekä kitkan välisiä riippuvuuksia on esitetty kaavamaisesti seuraavassa kuvassa 14. Renkaan ja tienpinnan väliset kitkavoimat syntyvät renkaan pyöriessä tai liukuessa (jarrutus) tienpintaa pitkin. Ilmiöön sisältyy kaksi erilaista ilmiötä perustuen juuri mikrokarkeuteen ja makrokarkeuteen.

a) Mikrokarkeus, jota edustaa kivirakeiden pinnan tekstuuri, aiheuttaa kivirakeen ja kumin välisiä adheesiovoimia (alempi vasen osa kuvassa) pienen pienien karkeuksien tunkeutuessa kumiin. Adheesio syntyy kulutuspinnan kumin ja kivirakeen välille molekulaarisista sidoksista johtuen (van der Waals-voimat), jotka syntyvät alueille, joissa on suuret pintapaineet. Liukuminen aiheuttaa näiden sidosten venymisen, murtumisen ja relaxoitumisen ennen taas uutta sidosten syntymistä. Tuloksena on energian kulutusta – ja mikä tärkeintä – itse kitkavoiman syntyminen.

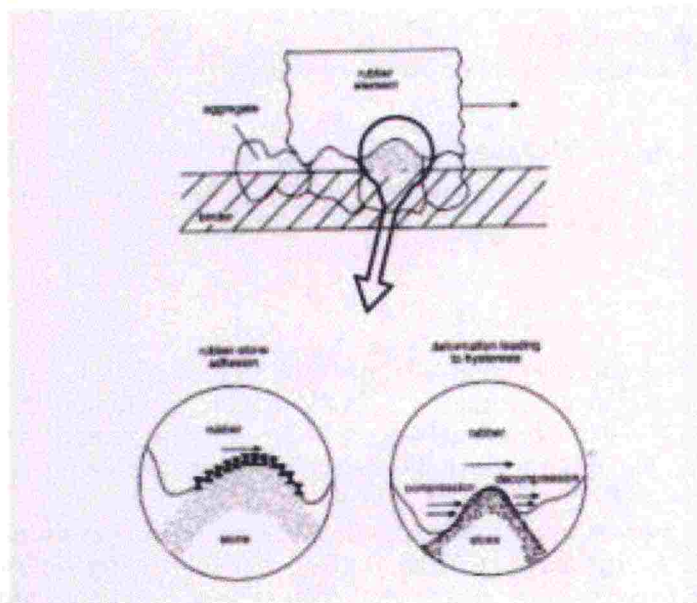
b) Makrokarkeus puolestaan aiheuttaa toisenlaisen mekanismin, joka sisältää renkaan kulutuspinnan deformatumisen päällysteen makrokarkeuden (aallonpituus 0,5–50 mm ja amplitudi 0,1–20 mm) vuoksi (alaosan kuvan oikea puoli). Tässä mekanismissa kulutuspinnan kumiin muodostuu puristusta kivirakeen etupuolelle ja venymistä (decompression) kivirakeen takapuolelle. Pyörän vetäessä ko. osat vaihtuvat. Osa puristusenergiasta palautuu takaisin, mutta osa energiasta muuttuu lämpöenergiaksi hysteresiskitkan vuoksi.

Em. kitkakomponenttien (adheesio/hysteresiskitka) suhteet riippuvat vallitsevista olosuhteista. Adheesiokitkan katsotaan olevan vallitseva kuivissa olosuhteissa renkaan rullatessa. Sen sijaan jarrutuksessa (liukuessa) kuivissa olosuhteissa korkeilla nopeuksilla hysteresiskitkan osuus on suurin.

Märällä tienpinnalla sen sijaan adheesio on pieni, sillä molekulaariset sidosvoimat eivät pääse muodostumaan ja siten makrokarkeudella on pääosa.



*Yhteenvetona voidaan esittää, että mitä suuremmalla nopeudella rengas pyörii tai jarruttaa sitä pienempi kitka on johtuen kosketuspinta-alan pienentymisestä (siihen taas vaikuttavat renkaan elastiset ym. ominaisuudet). Toisaalta mitä pienempiä tienpinnan epätasaisuudet (mikro- ja makrokarkeus) ovat, sitä pienempi on myös kitka ja siten myös vierintävastus.*



Kuva 14. Mikro- ja makrokarkeuden synnyttämät mekanismit tienpinnan ja renkaan kulutuspinnan välillä /13/.

Epäsuorasti toisaalta tiedetään, että mikrokarkeus vaikuttaa suuresti kitkaan ja renkaan kulumiseen ja tämän puolestaan täytyy vaikuttaa myös suoraan vierintävastukseen. Kuvassa 10 on esitetty arvio kitkan vaikutuksesta – <5 % – vierintävastukseen pitäen sisällään myös makrokarkeuden vaikutuksen. Näin ollen voidaan melko turvallisesti otaksua, että mikrokarkeuden vaikutus vierintävastukseen on 0–3 % olettaen, että makrokarkeuden osuus kitkaan on vähintään yhtä suuri kuin mikrokarkeudenkin.

Makrokarkeuden mittaaminen onnistuu staattisilla profilograafimittauksilla helposti käyttäen laseranturia, jonka laserpisteen koko on alle 0,25 mm ja mittaussväli on max. 0,25 mm.

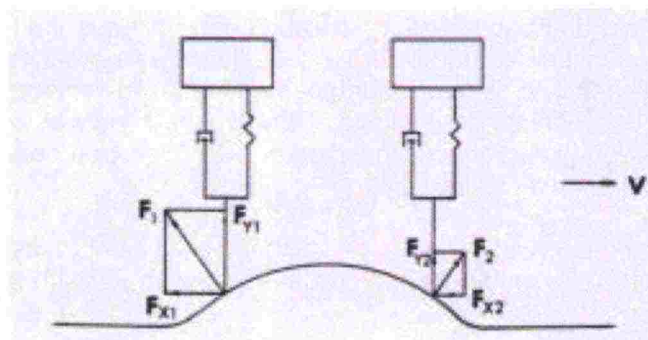
#### 3.1.2.4 Megakarkeus ja epätasaisuus

Megakarkeuden aallonpituusalue on 50–500 mm ja amplitudi vastaavasti 0,1–50 mm. Epätasaisuusalue (IRI) puolestaan jatkuu 0,5 m:stä 50 m:iin. Tätä pidemmät aallonpituudet katsotaan kuuluvan varsinaiseen tien pystygeometriaan.

Megakarkeuden ja epätasaisuuden alueella vierintävastus esiintyy aikaisemmin esitetyn vierintävastuksen luokittelun perusteella luokassa "energiahäviöt jousituksessa". Syy tähän selviää siitä mekanismista, jolla rengas liikkuu tiellä olevan niin suuren epätasaisuuden yli, että renkaan kulutuspinna ja

rakenne ei sitä "niele", vaan ajoneuvon jousitettu massa (runko) joutuu pys-  
tysuoraan liiketilaan.

Tilannetta selvittää seuraava kuva, jossa esitetään ne voimat, jotka vaikutta-  
vat neljännesajoneuvon ylittäessä epätasaisuuden (kuva 15). Täten iskun-  
vaimentimen lämpiämiseen kuluva energiahäviö = vierintävastuksen osa-  
komponentti makro- ja megakarkeus- sekä epätasaisuusalueella.



Kuva 15. Neljännesajoneuvon heilahduksenvaimentimeen kohdistuvat voi-  
mat renkaan ylitettäessä megakarkeuden tai epätasaisuuden luokkaa olevan  
esteen /13/.

Kuvasta 15 selviää, että epätasaisuuden kohtauspuolella esiintyy vastustava  
voima  $F_{x1}$  ja jättöpuolella vastaavasti potentiaalienergiasta johtuva lisäävä  
voima  $F_{x2}$ , joka kuitenkin on aina pienempi kuin  $F_{x1}$ . Vastaavasti heilahduk-  
senvaimentimessa mäntä tekee voimien  $F_{y1}$  ja  $F_{y2}$  vuoksi työtä, joka esiintyy  
lämpöenergian muodossa syntyvänä energiahäviönä eli vierintävastuksena.

$$F_m = 1/T(\sum F_x \cdot dt) \quad (6)$$

Käytännössä voiman  $F_x$  mittaaminen on hankalaa, mutta epäsuorasti sitä  
voidaan määrittää heijahduksenvaimentimen lämpötilaa ja siitä laskettavaa  
lämpöhäviötä mittaamalla.

## **4 PÄÄLLYSTEEN PITUUSPROFIILIN VAIKUTUS VIERINTÄVASTUKSEEN**

### **4.1.1 Mikrokarkeus**

Kuten aikaisemmin on todettu, ei mikrokarkeuden vaikutuksesta ole olemassa suoranaisia mittaustuloksia. Epäsuorasti mikrokarkeuden vaikutus ilmenee kitkan ja renkaiden kulumisen kautta. Mikrokarkeus vaikuttaa kitkaan ja siten myös vierintävastukseen kivirakeiden "santapaperipinnan" ja renkaan välisinä van der Waals-sidosvoimina, adheesiona. Tämä voima syntyy ainoastaan kuivalla tienpinnalla. Mikäli tienpinta on märkä, ei mikrokarkeudella ole käytännön vaikutusta vierintävastukseen.

Turvallinen arvio mikrokarkeuden suhteellisesta vaikutuksesta vierintävastukseen voi olla siten n. 10–20 % makrokarkeuden vaikutukseen verrattuna säätökijät huomioon ottaen.

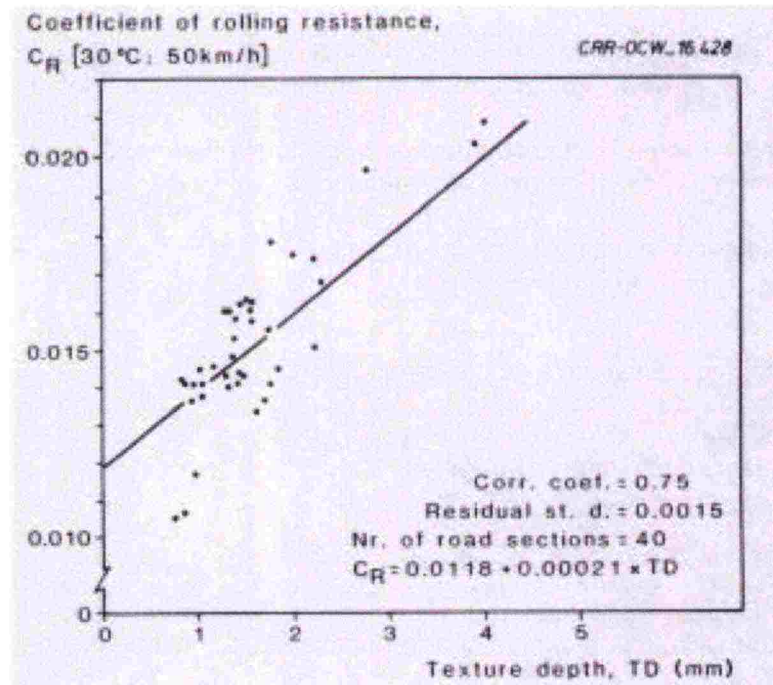
### **4.1.2 Makrokarkeus ja profiilisyyvyys**

Makrokarkeuden vaikutusta vierintävastukseen on tutkittu sekä CRR:n tapaisilla vedettävillä mittareilla että ajoneuvokokeilla. Useimmat kokeet sisältävät luonnollisesti koko epätasaisuusalueen alkaen mikrokarkeudesta ja päättyen epätasaisuuteen. Tästä aineistosta on tilastollisin menetelmin sitten tehty laskelmia eri karkeusalueiden vaikutuksesta.

Makrokarkeutta on aikaisemmin mitattu tavallisin Sand Patch -testin avulla ja vasta laserlaitteiden yleistyttyä on alettu käyttää arvoa MPD tai RMS kuvaamaan makrokarkeutta.

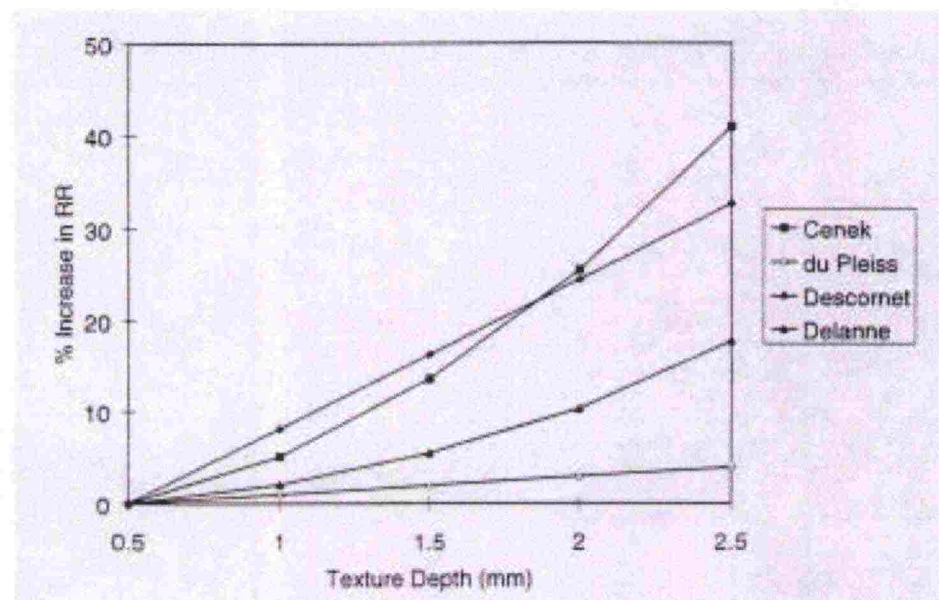
Kuvissa 16 ja 17 on esitetty eräistä tutkimuksista saatuja päällysteen makrokarkeutta kuvaavan tekstuurisyyvyuden (Sand Patch) ja vierintävastuskertoimen välisiä yhteyksiä.





Kuva 16. CRR:n vedettävällä vierintävastuksen mittausvaunulla saatuja tuloksia profiilin keskisyvyyden TD (Sand Patch -menetelmä) ja vierintävastuskertoimen välisestä yhteydestä /11/.

Kuvan 16 tuloksista voidaan laskea, että esim. 1mm:n makrokarkeuslisäys lisää vierintävastuskerrointa n. 10–15%.



Kuva 17. Yhteenveto eräistä profiilin keskisyvyyden ja vierintävastuksen välisistä riippuvuuksista /14/.

Kuvassa 17 esitetyistä tuloksista Cenekin tekemissä on käytetty henkilöautoja ja päällystetyyppejä oli 13, joista 2 AB-päällystettyä ja loput sirotepintauksia. Päällysteiden IRI-tasaisuus vaihteli välillä 1,4–2,2 eli varsin vähän. Koemenetelmänä oli "steady state torque method", jonka sanotaan olevan ylivoimainen verrattuna "coast down" -menetelmään.

Cenek esitti seuraavan kaavan:

$$C_{ro} = 0.0124 + 0.00043 \cdot IRI \cdot TD^2 \quad (7)$$

$$r^2 = 0,75$$

$C_{ro}$  on staattinen vierintävastuskerroin

du Pleissin (Etelä-Afrikka, kolme ajoneuvotyyppiä, tyypilliset tiet, VOC-mallin kehittäminen) saama riippuvuus oli seuraava:

$$Cr = 0.144 + 4.46 \cdot 10^{-3} \cdot IRI + 3.04 \cdot 10^{-3} \cdot TD \quad (8)$$

$$r^2 = 0.39$$

Edellä oleva duPleissin malli sisältää myös IRI:n osuuden ja osoittaa, että yhden IRI-yksikön vaikutus on samaa suuruusluokkaa kuin makrokarkeuden TD kasvu 1 mm:llä.

Kuvan 17 perusteella voidaan todeta, että keskimäärin aiheuttaa 1 mm:n makrokarkeusmuutos vierintävastuksen kasvun n. 12 % vaihtelun ollessa kuitenkin melko suurta (erityisesti yksi tutkimus). Tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia kuvan 16 tulosten kanssa. Tulokset on saavutettu useilla erilaisilla mittausmenetelmillä, mikä osaltaan selittää hajontaa, mutta toisaalta lisää lopputuloksen merkittävyyttä.

### 4.1.3 Epätasaisuus IRI

Epätasaisuuden vaikutuksesta vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen on olemassa lukuisia tutkimuksia, joista yhteenvetona on esitetty kuva 18.

Source	Method	IRI* Range	Vehicle Type	% Change per Unit of IRI	
				Rolling Resist.	Fuel Cons.
Young (1988)	Coast down - artificial roughness	1.3 to 4.6	Truck		4.1
	Direct fuel measurement - artificial roughness	5.3 to 5.6	Car		3.1
	Direct fuel measurement - vehicles side by side	2.9 to 4.4	Car		3.6
	Direct fuel measurement - range of surfaces	1.7 to 3.4	Car		0.8
Ross (1981)	Direct fuel measurement - range of surfaces	8.5 to 1.7	Car		0.6
Bentley (1984)	Rolling resistance - range of surfaces	5.4 to 5.5	Car	2.6	0.5
Demme (1990)	Rolling resistance - range of surfaces	9.8 to 7.3	Car	4.8	0.8
Laguerre and Lucas (1990)	Rolling resistance - range of surfaces	1 to 6**	Car	6.6	1.2
Seefelt (1989)	Direct fuel measurement - range of surfaces	1 to 6*	Car		1.7
du Pleissin et al (1990)	Rolling resistance - range of surfaces	1.2 to 15	Car	3.4	0.7
			Truck	4.4	1.1
Watanabe et al (1987)	Rolling resistance - range of surfaces	2 to 14	Car	3.2	0.5
			Truck	1.8	0.5

\* 1 unit of IRI = 20 N/mC

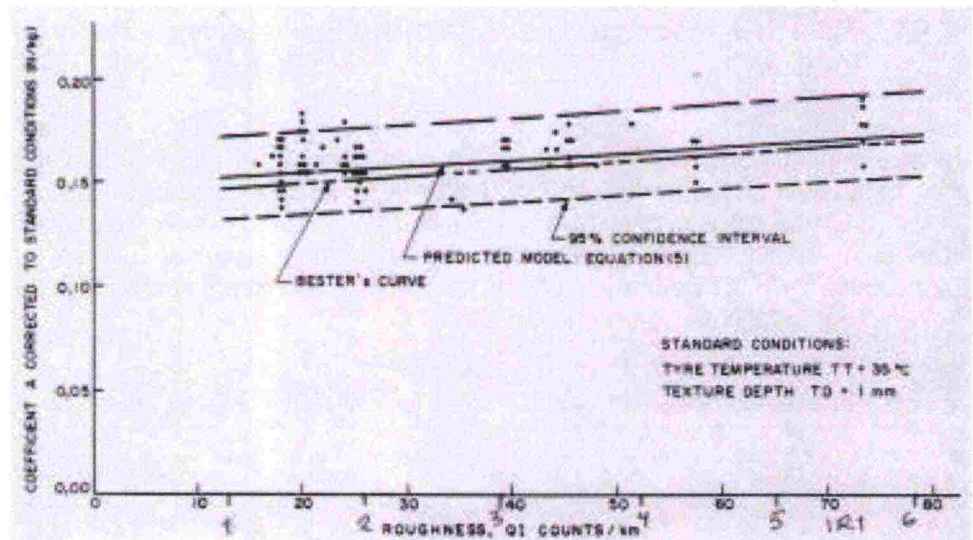
\*\* Estimated range

Kuva 18. Yhteenvedo IRI:n vaikutuksesta vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen /14/

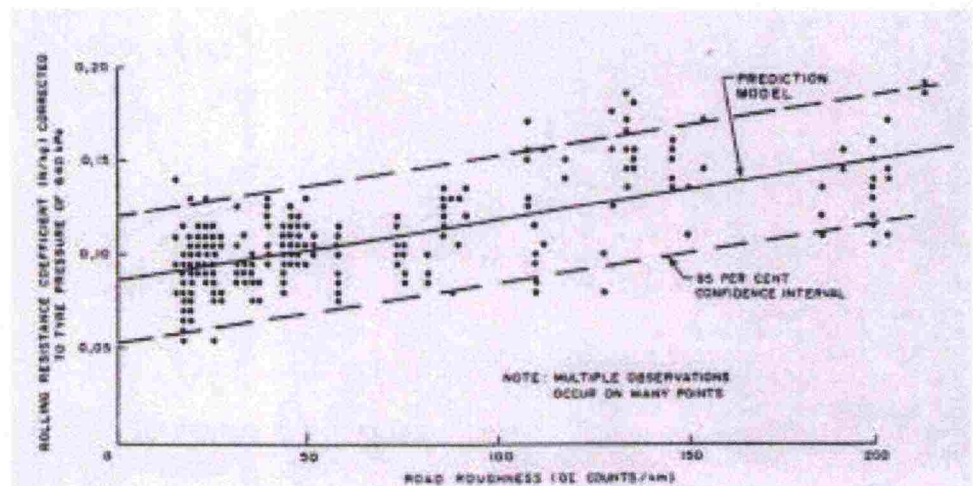


Kuvan 18 tuloksia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että osaan tuloksista sisältyy välttämättä myös muiden mikro-, makro- ja megakarkeuksien yhteisvaikutusta. Kuvan 18 vierintävastusmittausten tulokset on muutettu polttoaineenkulutukseksi vakiokertoimella 0,2 (eli 10 % muutos vierintävastuskertoimessa aiheuttaa 2 % muutoksen polttoaineenkulutuksessa). Yleisesti otaksutaan, että kuorma-autoilla vastaava kerroin on 0,25.

Esimerkkinä edellisen kuvan sisältämistä tutkimuksista on duPlessiksen yms. tekemä QI-indeksiin perustuva vierintävastuskertoimen ja päällysteen epätasaisuuden välinen yhteys henkilö- ja kuorma-autoille (kuvat 19 ja 20).



Kuva 19. Päällysteen epätasaisuuden QI ( $QI = n \cdot 13 \cdot IRI$ ) ja vierintävastuskertoimen välinen yhteys henkilöautoilla /15/.



Kuva 20. Päällysteen epätasaisuuden QI ( $QI = n \cdot 13 \cdot IRI$ ) ja vierintävastuskertoimen välinen yhteys kuorma-autoilla /15/.

IRI:n vaikutus vierintävastukseen voidaan edellä esitettyjen tutkimusten perusteella olevan seuraava: henkilöautoilla se on 2,5–6 % ja kuorma-autoilla 1,8–4 % yhtä IRI-yksikköä kohti. Keskimäärin voidaan siten olettaa, että



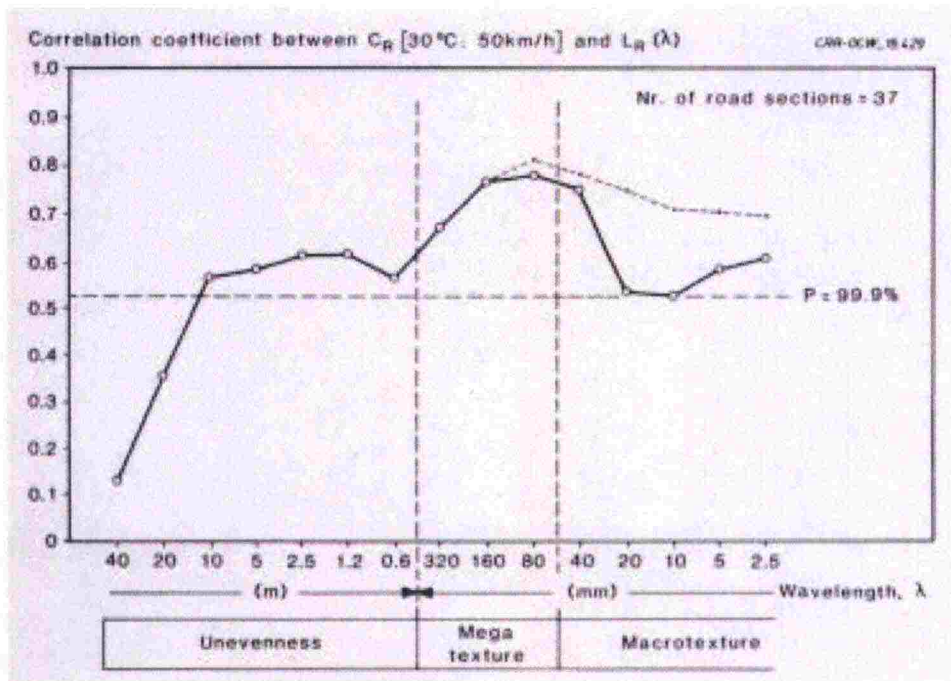
IRI:n vaikutus on n. 4 %/IRI-yksikköä henkilöautoilla ja vastaavasti kuorma-autoilla n. 2,5 %.

Polttoaineenkulutukseksi muutettuna saadaan vastaavasti keskimäärin 0,8 ja 0,5 %/IRI-yksikköä.

Käytännössä tämä merkitsee sitä, että esim. uuden päällysteen tasaisuuden muuttuessa käytön aikana IRI 1:stä IRI 2,5:een sen polttoainekulutusta kasvattava vaikutus on n. 1,2/0,8 % henkilö/kuorma-autoille.

#### 4.1.4 Makro- ja megakarkeuden sekä epätasaisuuden yhteisvaikutus

Osa kokeista on tehty siten, että on selvitetty koeobjektien riittävän tarkasti mitatusta pituusprofiilista sekä makro- ja megakarkeuden että epätasaisuuden tunnusluvut. Kun tiedonkeruu tehdään riittävän tiheästi (esim. 1,25 mm /11/ tai 1 mm /16/) voidaan tutkia eri aallonpituusalueita oktaavialueittain. Kahdessa edellä viitatussa tutkimuksessa on saatu seuraavat tulokset eri oktaavialueiden ja vierintävastuksen tai polttoaineenkulutuksen korrelaatiokertoimen avulla ilmaistuna (kuvat 21 ja 22).

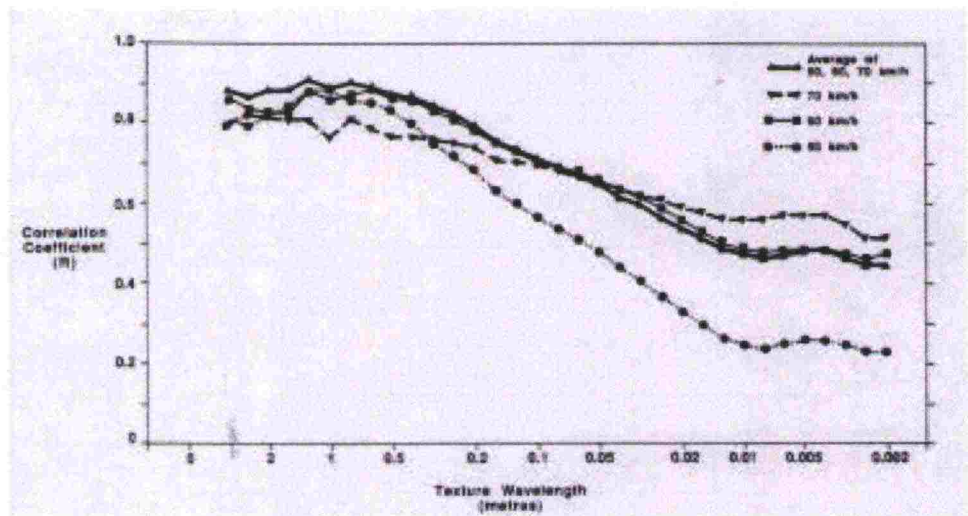


Kuva 21. CRR:ssä vedettävällä vierintävastuksen mittausvaunulla tehtyjen tutkimuksen tuloksia, joissa verrataan oktaavialueittain karkeuden ja epätasaisuuden korrelaatiota vierintävastukseen /11/. Katkoviiva kuvaa tilannetta, jossa aineistosta on poistettu betonipäällyste, jossa oli poikittainen timanttisahaus pintakäsittelynä.

Suurin korrelaatio on alueella 4–16 cm, mikä vastaa henkilöauton renkaan kosketuspintaa renkaan vieressä päällysteen pinnalla.

Epätasaisuuden puolella on havaittavissa, että yli 10 m aallonpituudella vaikutus vierintävastukseen vähenee voimakkaasti.

Ruotsissa on VTI:llä tehty tutkimus polttoaineenkulutuksesta ajettaessa Volvo-henkilöautolla 20 eri päällystekohteella. Vastaavalla tavalla kuin CRR:n tutkimuksessa on verrattu oktaavialueittain karkeuden ja epätasaisuuden korrelaatiota polttoaineenkulutukseen (kuva 22).



Kuva 22. Aallonpituuden ja polttoaineenkulutuksen välinen korrelaatio henkilöautolla (Volvo) tehdyssä tietutkimuksessa /16/.

Edellä esitetty koe on tehty kolmella eri nopeudella, millä osoittautuu olevan erittäin selvä vaikutus siihen, mikä aallonpituusalue "dominoi" polttoaineenkulutusta. Yleisesti ottaen koko aallonpituusalue makro- ja megakarkeus sekä epätasaisuus vaikuttavat pa-kulutukseen, mutta selvimmin tässä tutkimuksessa tuli esille epätasaisuusalue 0,5–3,5 m (pitempiä aaltoja ei mitattu).

#### 4.1.5 Yhteenveto päällysteen pituusprofiilin vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen (ja vierintävastukseen)

Edellä esitetyissä tutkimuksissa on vielä runsaasti sellaista aineistoa, johon ei ole päästy kiinni alkuperäislähteen avulla. Seuraavassa esitetään yhteenveto "kaikista" tiedossa olevista tutkimuksista, jotka on tehty parin viime vuosikymmenen aikana.



Data source	$\Delta FC$ due to macrotexture	$\Delta FC$ due to megatexture	$\Delta FC$ due to unevenness	Comments
VTI, Sweden [Sandberg, 1990-I]	7 %	8 %	16 %	Fuel consumption measurements using a Volvo car on 20 sites
CRR, Belgium [Descomet, 1990]	17 % <sup>1</sup>	13 %	7 % <sup>2</sup>	Trailer method. <sup>1</sup> Tyre without pattern. Value probably lower for a patterned tyre. <sup>2</sup> All losses were not measured. True value may be considerably higher.
LCPC, France [Laguerre & Lucas, 1990]	7-10 %	-	5-7 % <sup>3</sup>	<sup>3</sup> Value probably underestimated due to co-variation with macrotexture
Works, New Zealand [Cesek & Shaw, 1989]	7 %	-	-	Rolling resistance measurements using an instrumented car
Dunlop, U.K. [Williams, 1981]	10 %	14 %		Values are ~ 6 % resp. 6 % if an extreme, smooth steel drum is included in the test sample
CSIR, South Africa [du Plessis et al, 1990]	2 %	-	6 %	Coast-down technique used. Corresponding values for trucks are 0 %, resp. 10 %
BAST, Germany [Ulrich et al, 1996]	10 %	12 %		Measurements made on internal drum facility. Also noise and friction meas.
VTI, Finland [Sistonen et al, 1983]	7 %			
Works, New Zealand [Transearch, 1994]	20 %			
GM, USA [deRaad, 1978]	21 %			
TRL, United Kingdom [Ramshaw, 1981]	4 %			
TRL, United Kingdom [Young, 1988]			10 %	Corresponding value for trucks is 25 %
Data from Brazil [Watanabata et al, 1987]			8 %	
Wisconsin DoT, USA [Rosa, 1982]			2 %	
Pretoria, South Africa [Bester, 1984]			12 %	
Summary of above:				
Range	2-21 %	8-14 %	2-16 %	
Average	10 %	12 %	8 %	

Kuva 23. Yhteenveto eri tutkimuksista makro- ja megakarkeuden sekä epätasaisuuden vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen /4/.

Kuvassa 23 on esitetty nimenomaan polttoaineenkulutuserisäys  $\Delta FC$ . Eräissä tutkimuksissa on tutkittu ainoastaan vierintävastusta, mutta kuvan taulukon arvot on muunnettu vierintävastuskertoimesta kertoimella 0,25. Kuvassa 18 puolestaan oli vastaavana muuntokertoimena käytetty arvoa 0,2.

Kuvan 23 yhteenvetotuloksista voidaan esittää eri karkeus- ja tasaisuusalueiden keskinäisiä vaikutuksia polttoaineenkulutukseen. Merkittävin tekijä näyttäisi olevan megakarkeus (n. 12 %), toiseksi merkittävin makrokarkeus (n. 10 %) ja kolmanneksi tulee epätasaisuus (n. 8 %). Nämä arvot kuvaavat lähinnä säästömahdollisuuksien koko aluetta. Aikaisemmin esitetyissä karkeus- ja epätasaisuustarkasteluissa on esitetty yksikkökohtaiset arviot kyseisistä vaikutuksista vierintävastukseen ja polttoaineen kulutukseen.



## 4.2 Vierintävastukseen vaikuttavat muut kuin päällystetekijät

### 4.2.1 Yleistä

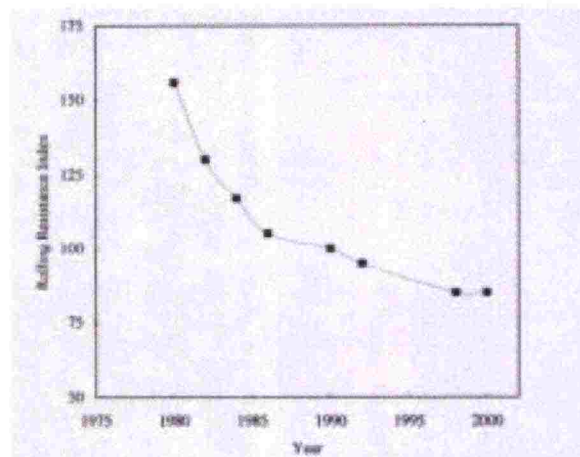
Pääasialliset vierintävastukseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa neljään ryhmään:

- Tien pintaominaisuudet (mikro-, makro- ja megakarkeus sekä epätasaisuus)
- Renkaan ominaisuudet (rakenne- ja materiaalitekijät)
- Ympäristöolosuhteet (lämpötila, päällysteen pinnan tila kuiva pinta/vesi/lumi/ /jää)
- Toimintaolosuhteet (nopeus, kuormitus, rengaspaine, ohjausgeometria, luisto)

Edellisissä kappaleissa on kuvattu päällystetekijöiden vaikutusta, tässä keskitytään muiden muuttujien vaikutuksiin vierintävastukseen menemättä kuitenkaan osassa muuttujissa tarpeettoman syvälle aihepiiriin.

### 4.2.2 Renkaan ominaisuudet

Renkaan vierintävastusominaisuuksien parantaminen on rengasvalmistajien eräs keskeisistä kehityssuuntauksista. Sillä on suurta merkitystä kaupallisesti sekä rengastehtaille itselleen – "Ekorengas" on yksi myynti- ja kilpailuvallti- että luonnollisesti autoilijoille alentuneita polttoainekustannuksina.

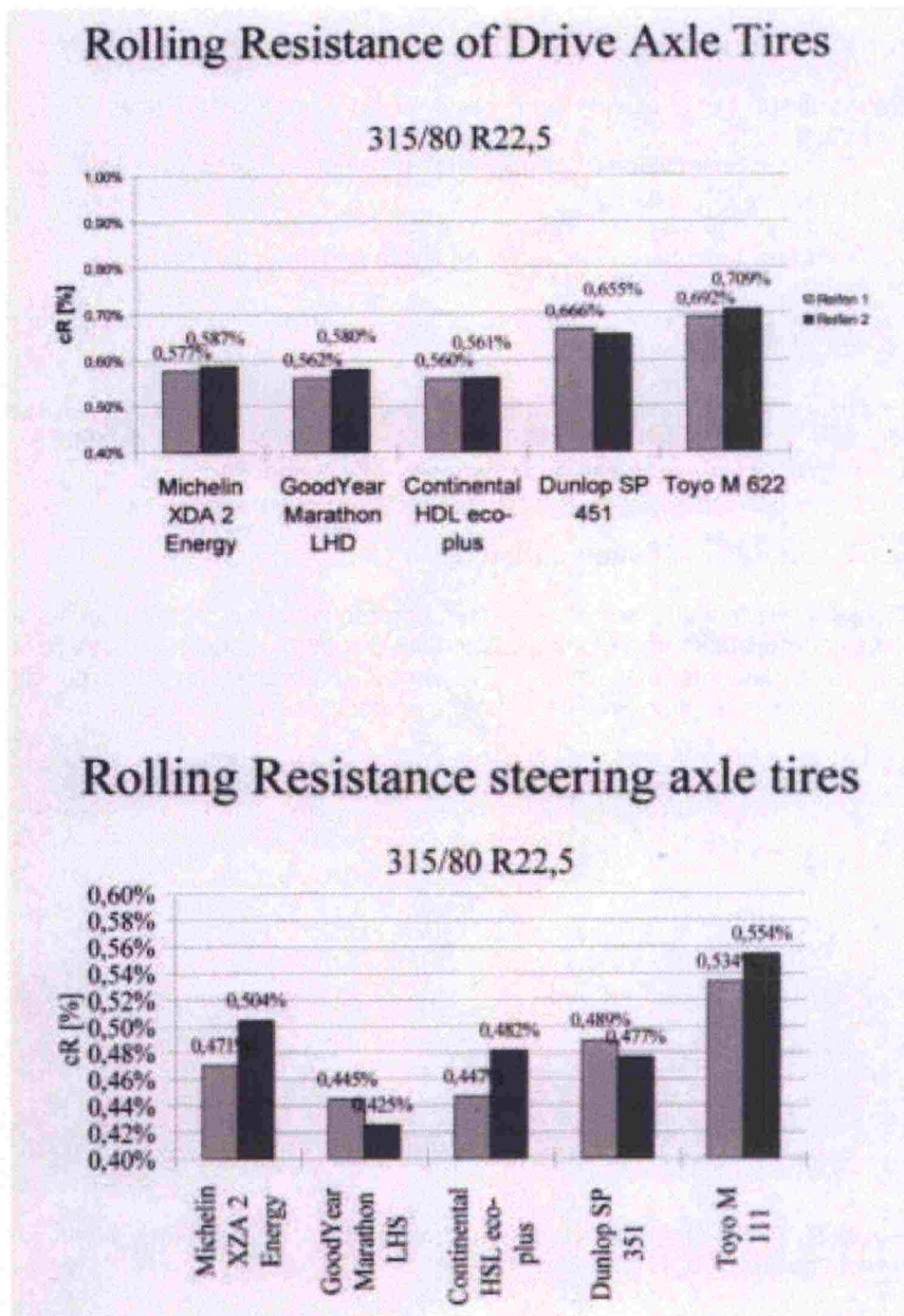


Kuva 24. Michelinin rengastehtaan ilmoittama vierintävastuksen alentumistrendi vuosien 1980–2000 aikana /9/.

Edellä olevasta kuvasta selviää, että erään yleisimmän rengastyypin vierintävastus on vuosien 1980–2000 välisenä aikana pienentynyt lähes 40 %, mikä polttoaineenkulutuksen pienentymisenä vastaa n. 8–10 %!

Renkaiden vierintävastukseen vaikutetaan mm. sekä renkaan rakennetekijöiden että materiaalien ja kuvionsuunnittelun avulla.

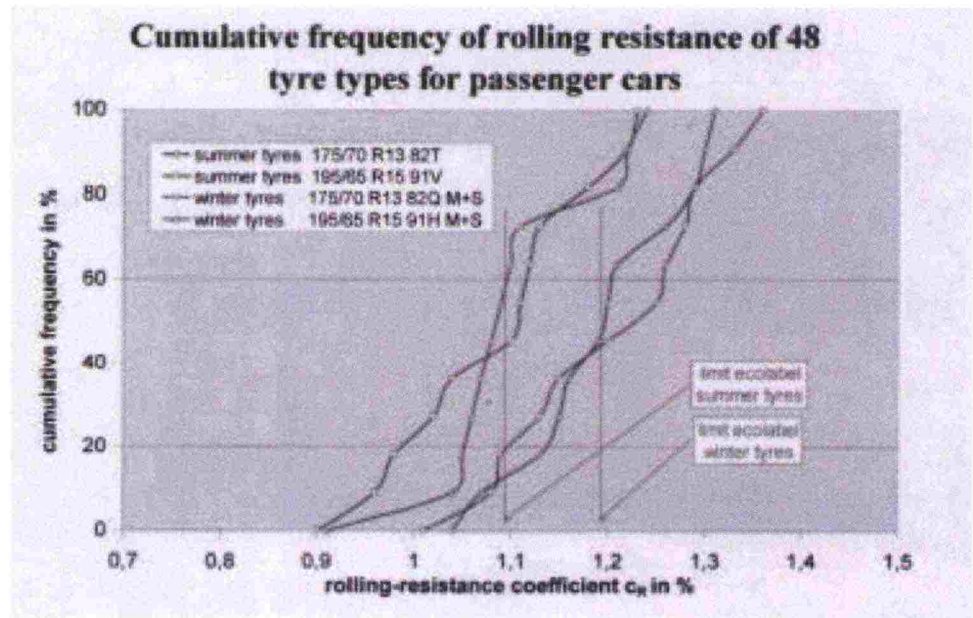
Seuraavissa kuvissa on esitetty tyypillisiä tuloksia sekä henkilöautojen että raskaiden ajoneuvojen mitatuista vierintävastuskertoimista.



Kuva 25. Kuorma-autojen vetävien ja ohjaavien pyörien renkaiden vierintävastuskertoimia saksalaisen tutkimuksen mukaan /17/.

Ominaista kuorma-autojen renkaiden vierintävastuskertoimille on se, että vetävien pyörien kertoimet ovat n. 1,2–1,3 -kertaisia ohjaaviin pyöriin verrattuna (0,425–0,554 % vs. 0,560–0,709 %).





Kuva 26. Henkilöautojen kesä- ja talvirenkaiden vierintävastuskertoimia saksalaisen tutkimuksen mukaan /17/.

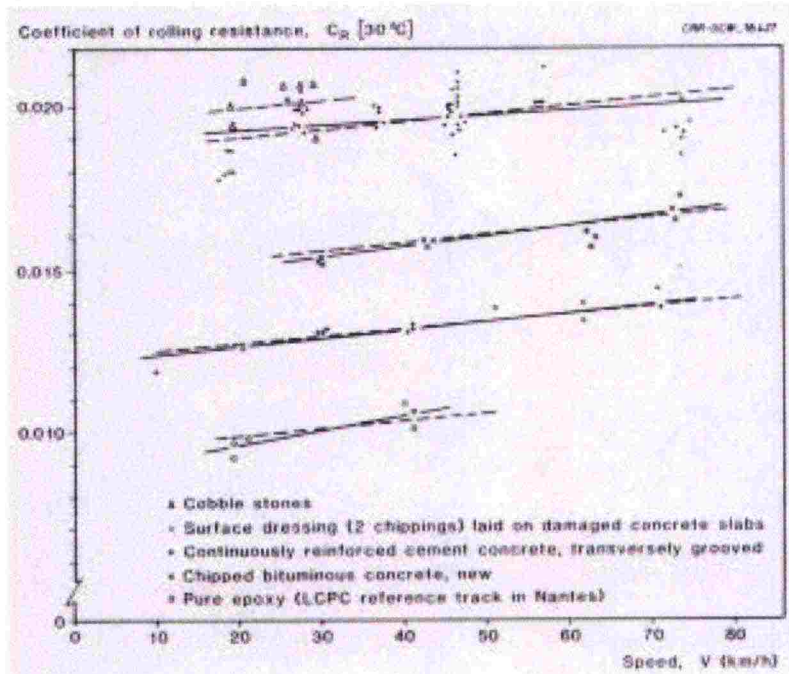
Henkilöautojen renkaiden vierintävastuksissa on selvä ero 195/65 R15 renkaiden hyväksi sekä kesä- että talvirenkailla 175/70 R13 renkaisiin verrattuna. Sen sijaan vastaavien kesä- ja talvirenkaiden välillä ei ole selvää eroa muuten kuin siinä, että kesärenkailla on saavutettu pienimmät vierintävastuserroarvot.

#### 4.2.3 Ajonopeus

Ajonopeudella on selvä vaikutus renkaiden vierintävastukseen siten, että ajonopeuden kasvaessa myös vierintävastus kasvaa. Ajonopeuden vaikutuksen tutkimisen tekee hankalaksi se, että ajonopeus ja ilman lämpötila vaikuttavat sekä rengaspaineeseen että renkaan lämpötilaan. Pelkän nopeusvaikutuksen erottaminen vierintävastuksen muutoksista koetilanteissa vaatii em. lämpötila- ja painemuuttujien tuntemista.

Parhaiten tämä onnistuu CRR:n kaltaisella (kuva 12) laitteella, jolla tehtyjen tutkimusten tuloksia on esitelty kuvassa 27.





Kuva 27. Ajonopeuden vaikutus henkilöauton tyypiseen renkaaseen erilaisilla ajopinnoilla siten, että lämpötila on vakioitu (ilma  $30^{\circ}\text{C}$  ja rengas  $50^{\circ}\text{C}$ ) /11/.

Nopeuden aiheuttama vierintävastuksen lisäys näyttää olevan lineaarinen erilaisilla tiepinnoilla. Luonnollisesti pinnan laatu vaikuttaa voimakkaasti vierintävastuksen suuruuteen sinänsä.

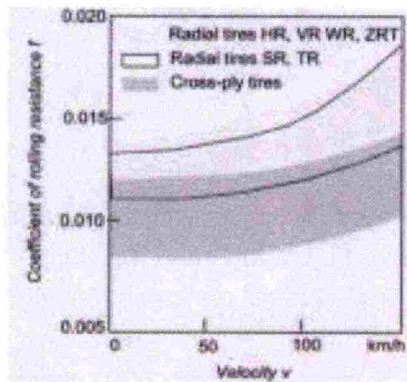
Kuvan 27 aineiston perusteella on laskettavissa, että vierintävastuksen muutoksen nopeusriippuvuus (kuvassa olevien suorien kulmakerto) on seuraava:

$$C_R\text{-muutos} = 0,000024 \text{ per km/h} \quad (9)$$

Esimerkkinä voidaan mainita, että nopeuden kasvaessa 50 km/h (esim. 50–100 km/h) vierintävastuksen lisäys on 0,0012, mikä lisättynä tyypilliseen vierintävastuksen arvoon 0.012 merkitsee siis 10 % vierintävastuksen kasvua eli n. 2–2,5 % polttoaineenkulutuksen kasvua.

Toisena esimerkkinä vierintävastuksen ja nopeuden välisestä riippuvuudesta tarjoaa kuva 28, jossa on tarkasteltu kahta henkilöautorengasta – vyören-gasta ja ristikudosrengasta – tasaisella tienpinnalla normaalisti kuormitettuna ja suositetussa rengaspaineessa.

Huomionarvoista on se, että nopeuden vaikutus kasvaa henkilöautojen ollessa kyseessä 2. potenssissa ja erityisen selvästi ajonopeuden ollessa yli 100 km/h. Toinen mielenkiintoinen asia on se, että ristikudosrenkaiden vierintävastus on huomattavasti alhaisempi kuin vyörenkaiden. Ristikudosrenkaat ovat tosin kadonneet markkinoilta täysin vyörenkaiden muiden hyvien ominaisuuksien vuoksi.



Kuva 28. Ajonopeuden vaikutus vyö- ja ristikudosrenkaiden vierintävastuskertoimeen tasaisella tienpinnalla normaalikuormituksella ja -rengaspaineella /18/.

Kirjallisuudesta löytyy lisäksi seuraavanlaisia kaavoja ajonopeuden ja vierintävastuskertoimen väliselle yhteydelle sekä henkilö- että kuorma-autojen erilaisille rengastypeille:

Wong, eq 1.1-1.4:

Radial-ply passenger car tire:  
 $f = 0.0136 + 0.04 \cdot 10^{-6} \cdot v^2$

Bias-ply passenger car tire:  
 $f = 0.0169 + 0.19 \cdot 10^{-6} \cdot v^2$

Radial-ply truck tire:  
 $f = 0.006 + 0.23 \cdot 10^{-6} \cdot v^2$

Bias-ply truck tire:  
 $f = 0.007 + 0.45 \cdot 10^{-6} \cdot v^2$

$v$  in km/h

---

Gillespie, eqs 4-16a & 4-16b:

Radial-ply truck tire:  
 $f = (0.0041 + 0.000041 \cdot v) \cdot C_A$

Bias-ply truck tire:  
 $f = (0.0041 + 0.000041 \cdot v) \cdot C_A$

$C_A = 1$  for smooth concrete  
 $= 1.2$  for worn concrete, cold blacktop  
 $= 1.5$  for warm blacktop

$v$  in mph

Kuva 29. Ajonopeuden vaikutus vierintävastuskertoimeen erilaisilla ha- ja ka-renkailla ja päällystetyypeillä /18/.

Yhteenvetona edellä olevista kaavoista voidaan esittää seuraavaa:

- vierintävastus kasvaa ajonopeuden neliössä henkilöautoilla, mutta se voidaan esittää myös suoraviivaisena alle 80 km/h nopeusalueella
- vierintävastus voidaan esittää joko suoraviivaisena tai 2. potenssissa kuorma-autojen ollessa kysymyksessä (ajonopeus alue on tosin myös pienempi)



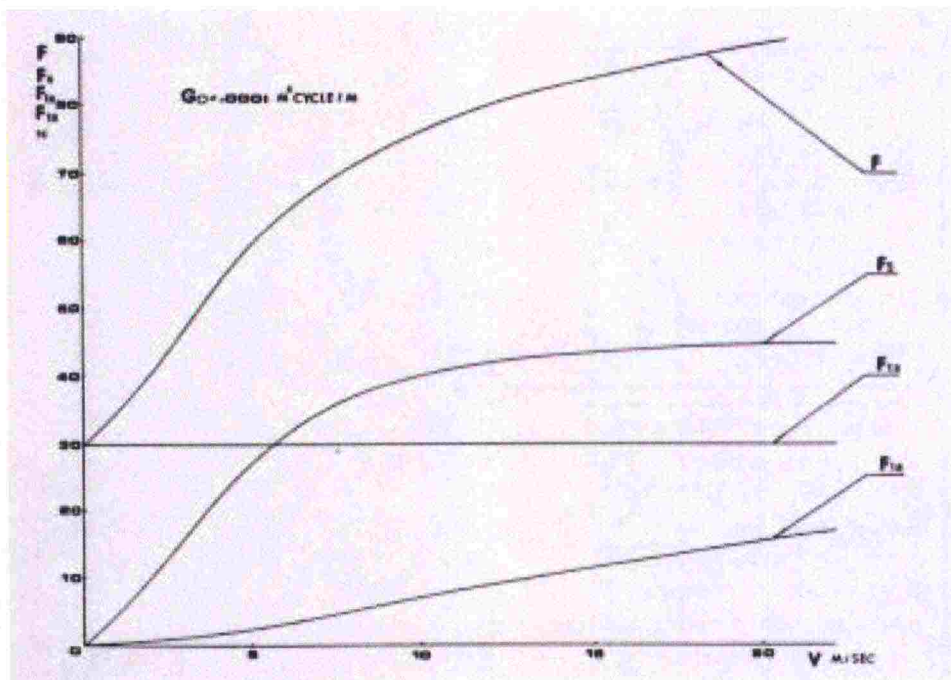
Päällystetyypillä on suuri vaikutus:

- tasainen betoni, kerroin 1,0
- kulunut betoni ja kylmä Ab, kerroin 1,2
- lämmin asfalttipäällyste, kerroin 1,5

Kolmannen tarkastelutavan tarjoaa täysin teoreettinen lähestymistapa, jossa on tarkasteltu vierintävastusvoiman kolmen eri komponentin ( $F_{ta}$ =pinnan karkeus,  $F_{ts}$ =absoluuttisen tasainen pinta ja  $F_s$ =jousituksen lämpöhäviöt) nopeusriippuvuutta (kuva 30).

Teoreettinen tarkastelu antaa tulokseksi sen, että absoluuttisen tasaisella pinnalla nopeudella ei ole vaikutusta, makro- ja megakarkeudella on lineaarinen vaikutus ja suuret epätasaisuudet, jotka aiheuttavat männän liikettä iskunvaimentimissa vaikuttavat eniten, joskin epälineaarisesti.

Kuvassa esitetyt käyrät ovat vierintävastusta kuvaavassa voima/nopeus-asteikossa, josta selviää myös vierintävastuskomponenttien keskinäiset suhteet.



Kuva 30. Teoreettiseen tarkasteluun perustuva nopeuden vaikutus vierintävastuksen osakomponenttien suuruuteen ja keskinäiseen suhteeseen /12/.

Kuvan 30 ja muun lähdeviitteen /12/ aineiston perusteella saadaan nopeusvaikutuksen suuruusluokaksi:

15 N/3000 N = 0-20 m/s (0-72 km/h)

eli

Kulmakerroin=0,00007 per km/h

(10)

Kaavaan 9 ja kuvaan 29 verrattuna kaavan 10 teoreettinen tulos on samaa suuruusluokkaa.



#### 4.2.4 Renkaan lämpötila

Renkaan lämpötilalla ja vierintävastuksella on vakio-olosuhteissa selvä ja tunnettu keskinäinen riippuvuus, joka on muotoa:

$$C_r(T) = C_r(T_0) \cdot \exp((T - T_0)/T_1) \quad (11)$$

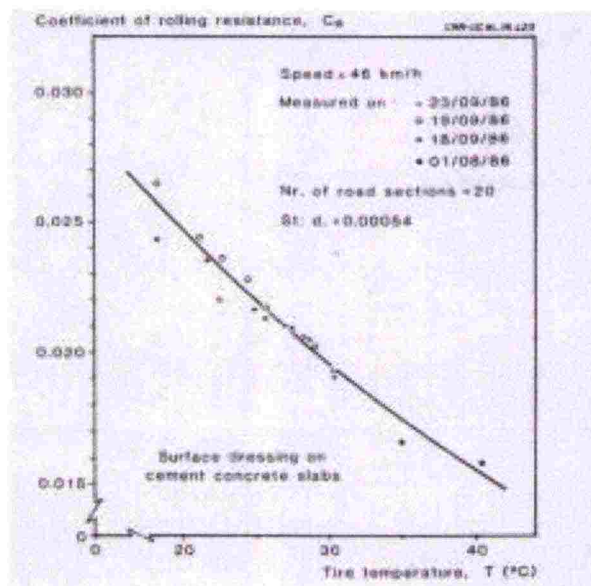
$T$  renkaan lämpötila, °C  
 $T_0$  vertailulämpötila, esim. 30 °C  
 $T_1$  lämpötilavakio, esim. 47 °C

Renkaan lämpötilaan vaikuttavat ulkoiset tekijät ovat:

- ulkoilman lämpötila
- päällysteen pintalämpötila
- nopeus
- ajomatka

Renkaan lämpiäminen aiheutuu vierintävastuksena ilmenevistä energiahäviöistä – pääasiassa hysteresiksestä.

CRR:n vierintävastusvaunulla tehtyjen kokeiden mukaan on päädytty kuvaan 31 esitettyihin tuloksiin, jotka noudattavat kaavaa (11) olettaen, että  $T_1 = 47$  °C. Keskihajonta 0.00054 on n. 2,5 % mitatusta arvosta ja samalla on myös mitta menetelmän toistettavuudesta.



Kuva 31. Vakioajonopeudella 46 km/h mitattu vierintävastuskertoimen ja renkaan lämpötilan välinen riippuvuus, joka noudattaa kaavaa (11) sovitettaessa lämpötilaksi  $T_0 = 47$  °C /11/.

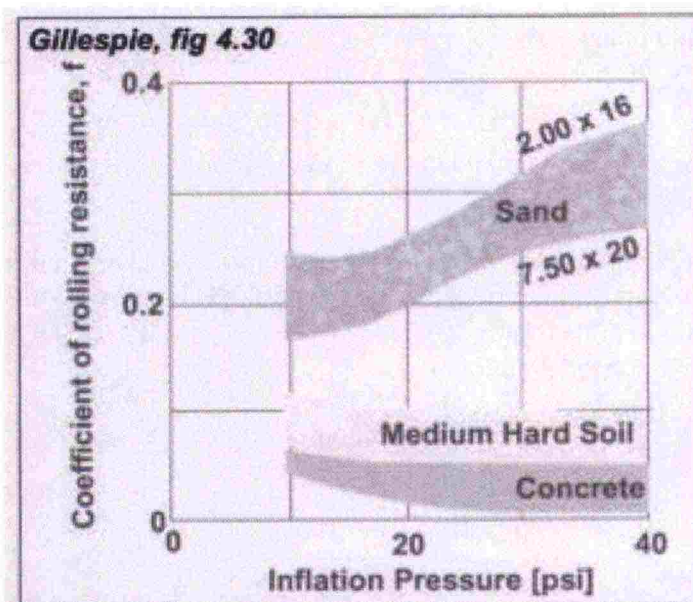
Kuvan aineistosta voidaan laskea, että renkaan lämpötilavaikutus vierintävastuskertoimeen on seuraava:

$$dC_r/dT = n. 0.0005 \text{ per } ^\circ\text{C} \quad (12)$$

Koska renkaan lämpötilaan vaikuttaa hyvin moni tekijä ja renkaan lämpötilan vaikutus on verrattain voimakas, on eri tutkimustuloksia ja kokeita keskenään verrattaessa tiedettävä tarkasti vallinneet koeolosuhteet. Useinkaan tämä ei ole mahdollista ja eri kokeista saadut tulokset kertovat siten lähinnä ko. olosuhteissa tehtyjen vertailtavien muuttujien eroista.

#### 4.2.5 Renkaan ilmanpaine

Renkaan ilmanpaineen vaikutusta vierintävastuskertoimeen on esitetty kuvassa 32. Siinä on myös esitetty erilaisten pintojen vaikutus.



Kuva 32. Renkaan ilmanpaineen ja pinnan laadun vaikutus vierintävastuskertoimeen /18/.

Edellä olevasta kuvasta voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset (Onko otettu huomioon nopeuden ja lämpötilan vaikutukset?) :

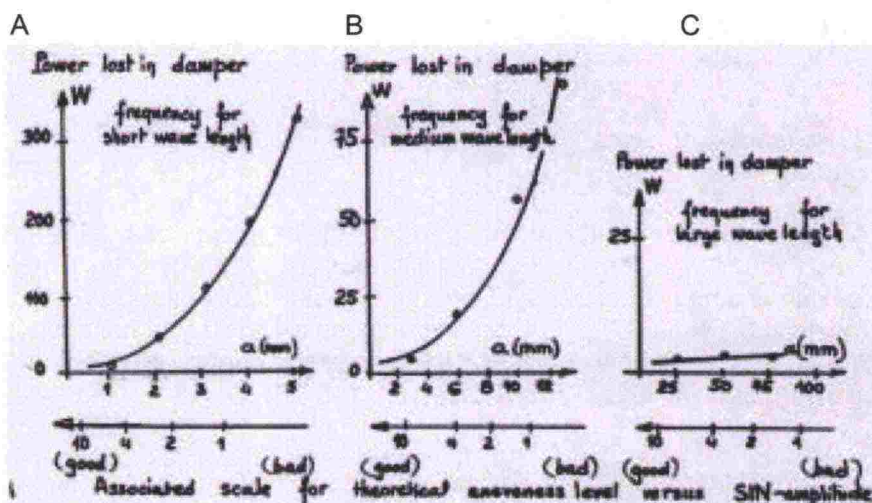
- kiinteällä alustalla renkaan ilmanpaineen suureneminen pienentää vierintävastusta
- pehmeällä alustalla vierintävastus kasvaa renkaan ilmanpaineen kasvaessa (kosketuspinta-ala ja pintapaine ovat vaikuttavina tekijöinä renkaan "upotessa" alustaan ja työntäessä löysää materiaalia syrjään)
- betonipäällysteellä on selvästi alhaisempi vierintävastuskerroin kuin asfalttipäällysteellä (vrt. myös kuvaa 29, jossa betoneille on annettu kertoimet 1,0, ja 1,2 ja asfalttipäällysteille 1,2 ja 1,5)

#### 4.3 Energiahäviöt jousituksessa

Epätasaisuuden vaikutuksia teoreettisella tasolla on aikaisemmin esitelty kuvassa 15. Siinä on esitetty renkaan ylittäessä epätasaisuuden siinä syntyvät voimat ja energiahäviöt, jotka esiintyvät heilahduksenvaimentimen tekemänä työnä. Se puolestaan on mitattavissa vaimentimessa kehittyvänä lämpöenergiana.

Käytännössä vaimentimien lämpötila olisi helposti mitattavissa, mutta ongelmana on tienpinnan sisältämien kaikkien epätasaisuuksien aallonpituuksien vaikutusten erottaminen toisistaan. Parhaiten tämä onnistuu valvotussa kokeessa, jossa neljännesajoneuvo asetetaan hydrauliseen penkkiin siten, että penkkiä voidaan heilutella halutulla taajuudella ja amplitudilla ja seurata samalla vaimentimien lämpötilaa ja laskemalla siitä energiahäviö.

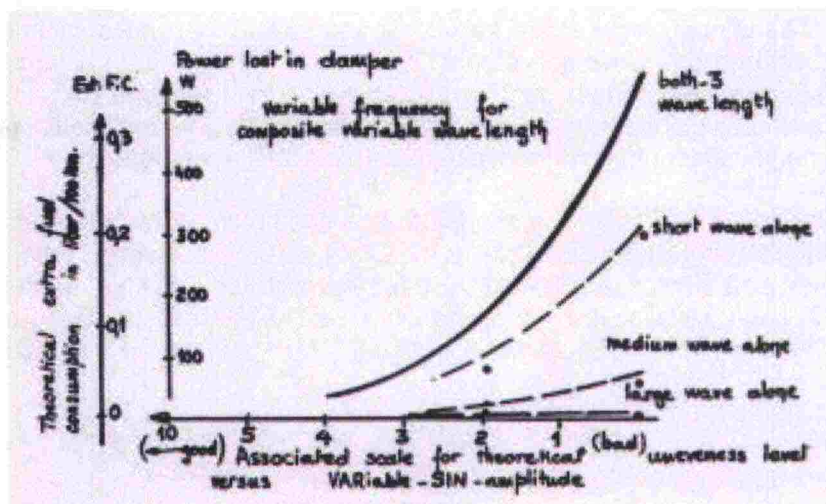
Tällainen koe on tehty Ranskassa siten, että koe suoritettiin kolmella eri aallonpituusalueella: A=1–3,3 m, B= 3,3–13 m ja C=13–40 m. Tällainen jaottelu johtuu Ranskassa käytössä olleesta APL-tasaisuusmittarista, joka erotteli aallonpituudet em. tavalla. Kunkin aaltoalueen sisällä koe on suoritettu eri amplitudeilla, kuten kuvan 33 tulokset osoittavat.



Kuva 33. Heilahduksenvaimentimien energiahäviöt dynaamisessa penkkiteistissä kolmella eri aallonpituusalueella ja eri amplitudeilla simuloituilla siniaalloilla /19/.

Vastaava koe suoritettiin myös siten, että samassa kokeessa vaihdeltiin aallonpituutta siten, että kaikki kolme aallonpituusaluetta olivat mukana. Muuttujana oli tien epätasaisuustaso (APL=1–10, ranskalainen tapa ilmoittaa epätasaisuus, jossa 10=hyvä ja 1=huono). Tulokset ovat kuvassa 34.





Kuva 34. Heilahduksenvaimentimien energiahäviö vaihtelevassa sinimuotoisessa aaltoliikkeessä /19/.

Kuvien 33 ja 34 tulokset osoittavat varsin yksikäsitteisesti sen, että tässä ko-  
keessa vain lyhyillä 1–3,3 m aallonpituuksilla oli käytännön merkitystä hei-  
lahduksenvaimentimien energiahäviöihin. Tavallisesti tieolosuhteissa esiin-  
tyvällä tasaisuusalueella  $APL=1-4$  on polttoaineenkulutusslisäys vastaavasti  
0,03–0,12 (x4) l/100 km eli n. 0,12–0,48 l/100 km per ajoneuvo. Prosentuaa-  
linen vaikutus polttoainekulutukseen on siten n. 1–5 %.

Huomionarvoista on se, että yli 3,3 m aallonpituusalueella ei iskunvaimenti-  
mien tekemällä työllä ole sanottavaa merkitystä.

Kuvan 33 x-akselin epätasaisuuden amplitudien arvoista voidaan määrittää  
likimääräiset IRI-arvot seuraavanlaisen päättelyn perusteella:

- a) Lyhyt aalto (A-alue)  
Oletus: aallonpituus=2mm ja amplitudi=1 mm
  - keskimääräinen siirtokerroin 1,5 (kuva 5)
  - aallonkorkeus on 2mm
  - $IRI = 1.5 \cdot 2 \text{ mm} / 2 \text{ m} = 1,5 \text{ mm/m}$
- b) Keskipitkä aalto (B-alue)  
Oletus: aallonpituus=10 m ja amplitudi =10 mm
  - keskimääräinen siirtokerroin 1,3 (kuva 5)
  - aallonkorkeus on 20 mm
  - $IRI = 1.3 \cdot 20 \text{ mm} / 10 \text{ m} = 2,6 \text{ mm/m}$

Vastaavalla tavalla voidaan laskea mielivaltaisen taajuuden ja amplitudin  
IRI-vastaavuus, mutta edellä esitetyt laskentaesimerkit (allekirjoittaneen laa-  
timat) osoittavat suuruusluokkia kuvien tuloksia tarkasteltaessa.

#### 4.4 Päällysrakenteen kantavuus (stiffness)

Päällysrakenteen ja päällysteen kantavuuden (jäykkyyden, taipuman) on jo kauan ajateltu vaikuttavan ajokustannuksiin vierintävastuksen kautta. Erityisesti tätä ajatusta ovat pitäneet esillä betonipäällysteiden kanssa tekemisissä olevat tahot – erityisesti sementti- ja betonteollisuus.

Vaikutusmekanismin on oletettu olevan seuraavan: raskaasti kuormitetun pyörän liikkeessä päällysteen pinnalla aiheuttaa se kuormituksellaan allasmaisen painanteen ja pyörä liikkuu koko ajan tämän altaan pohjalla yrittäen nousta ”mäkeä” ylöspäin samalla painaen tätä aaltoa alas/eteenpäin.

Seurauksena on siten vierintävastuksen kasvuna ilmenevä energiahäviö.

Toisaalta vaikutusmekanismin voidaan olettaa olevan päällysrakenteen kokoonpuristamiseen ja sen palautumiseen sitoutuva energia, siis hysteresisilmiö.

Päällysrakenteen painumana ja taipumana ilmenevä vierintävastus vaikuttaa vain raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutust-lisäykseen. Henkilöautoilla sen merkityksen voidaan katsoa olevan olematon normaaleissa liikenneolosuhteissa, sillä henkilöauton rengaskuormitus on vain 5–10 % kuorma-auton tavanomaisesta rengaskuormituksesta eikä se siten käytännössä aiheuta päällysteen painumista.

Teoreettista perustetta ja tarkastelua ei ole esitetty kirjallisuudessa.

Kirjoittaja ehdottaa seuraavia hypoteesejä tarkastelun perustaksi:

1. Kuormitus (=kuorma-auton pyörän välityksellä) tekee työtä rakenteen kokoonpuristamisessa.
2. Kuormittava voima  $F_{\text{rengas}} = 50\,000\text{ N}$  ( $=50\,000\text{ kgm/s}^2$ )
3. Tehty työ=kulunut energia  $W$  aiheutuu rakenteen kokoonpuristamisesta, joka vaihtelee rakenteen kantavuuden mukaan (esim.  $AB=0,3\text{--}3\text{ mm}$ )
4. Tehty työ  $W=\text{voima}\cdot\text{matka}$  (J, Nm) =  $50000\text{ N}\cdot0,0003/0,003\text{ m} = 15/150\text{ J}$  ( $=15/150\text{ Nm}=15/150\text{ Ws}$ )  
ja
5. Käytännössä sopiva tapa on tarkastella tehoa  $P$  (W tai J/s)
6. Keskeinen kysymys kuuluu: Missä ajassa pyörä tekee em. työn  $15/150\text{ J}$ ?
7. Hypoteesi: Työ tehdään taipumasuppilon alueella, käytännössä taipumasuppilon pohjalta noustessa tien pinnalle. (Todellisuudessa auto ei nouse ylös, vaan työntää aaltoa edessään ja jättää jälkeensä aaltoliikkeen.)
8. Ajoneuvon nopeus on  $80\text{ km/h}$  eli  $22\text{ m/s}$  ja taipumasuppilon säde  $2,2\text{ m}$  > aika on  $0,1\text{ s}$ , joten  $P = 15\text{ J}/0,1\text{ s} = 150\text{ W}$ .
9. Taipuman kasvaessa eli kantavuuden aletessa pienenee yleensä taipumasuppilon säde. Oletetaan, että taipuman ollessa  $3\text{ mm}$  on säde vastaavasti  $1,1\text{ m}$  (asika  $=0,05\text{ s}$ ) >  $P = 50000\cdot0,003/0,05 = 3000\text{ W}$ .
10. Koko ajoneuvon energiahäviöksi saadaan laskemalla kaikkien renkaiden aiheuttamat muodonmuutokset yhteen. Riittävä tarkkuus saadaan laskemalla suoraan ajoneuvon massan perusteella seuraavasti:  
 $P = 50000\text{ kg}\cdot10\text{ m/s}^2\cdot0,0003/0,1 = 1500\text{ W} = 1,5\text{ kW}$  ( $=2,0\text{ hv}$ )  
 $P = 50000\text{ kg}\cdot10\text{ m/s}^2\cdot0,003/0,05 = 15000\text{ W} = 15\text{ kW}$  ( $=20,4\text{ hv}$ )



11. Energiaksi tämä voidaan muuttaa jälleen olettamalla ajonopeudeksi 80 km/h, josta saadaan kilometrille kuluva ajaksi  $45 \text{ s} = h/80$ .  
12. Kilometrin matkalla kuluva energiahäviöksi muutettuna saadaan:

$$W = 1500 \text{ W} \cdot h/80 = 18,75 \text{ Wh}$$

$$W = 15000 \text{ W} \cdot h/80 = 0,19 \text{ kWh}$$

Edellä esitetty tarkastelutapa – mikäli se on oikea – osoittaa, että kuorma-auton renkaan tekemä työ rakenteen taipuman vuoksi on samaa suuruusluokkaa kuin epätasaisuuden aiheuttama energiahäviö heilahduksenvaimentimissa. Ratkaisevaa on aiheutetun painuman suuruus ja taipumasuppilon muoto. Tämä selittäisi osaltaan sen, että betonipäällysteellä taipuman ollessa erittäin pieni ja rakenteen jäykkyyden vuoksi taipumasuppilo on erittäin suuri, käytetty energia jää hyvin pieneksi.

Uudessa Seelannissa täyteen kuormatuilla instrumentoiduilla kuorma-autoilla tehdyissä tutkimuksissa valittiin 4 kpl Benkelmanpalkilla mitatulla taipumalla toisistaan selvästi eroavaa päällysterakennetta, joiden pintarakenne oli samankaltainen. Tulokseksi saatiin seuraava yhtälö:

$$C_o = 0.011 + 0.0033 \cdot D - 0.00044 \cdot M \quad (13)$$

jossa:

- $C_o$  on staattinen vierintävastuskerroin  
 $D$  on Benkelmanpalkilla mitattu taipuma, mm  
 $M$  on kuorma-auton massa (ton)

Kaavan avulla on laskettu ennusteita eri päällystetyypeille (kuva 35).

Pavement Type	Typical Deflection (mm)	$C_o$	% Diff. from PCC Pavement	
			$C_o$	Fuel
PCC	0.1	0.053	-	-
Deep strength AC	0.5	0.067	26	5
AC Surfaced	1.0	0.083	57	11
Strong granular	0.8	0.076	43	9
Weak granular	1.5	0.100	89	18

Kuva 35. Päällysrakenteen taipuman vaikutus kuorma-auton vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen /14/.

Kanadassa tehty tutkimus osoitti, että betonipäällysteisillä teillä kuorma-autojen polttoaineenkulutus oli keskimäärin 11 % pienempi kuin asfalttipäällysteisillä teillä /20/. Kokeen suorittamisen yksityiskohdista, kuten olosuhteista, päällysteen karkeudesta jne. ei ole tietoja käytettävissä.



Kirjallisuudessa esiintyy myös seuraavanlaisia tietoja taipuisien ja jäykkien päällysteiden eroista polttoainekulutuksen suhteen:

- polttoaineenkulutus: 20 % ero betoni- ja asfalttipäällysteillä /21/
- vierintävastus: 5–8 % ero betoni- ja asfalttipäällysteillä /22,23/

Myös Suomessa on tehty vastaavanlainen vertailututkimus Vt3:lle Nurmijärvelle v. 1992 valmistuneen betonipäällysteen rakentamisen yhteydessä. Vertailu tehtiin moottoritien kahden rinnakkaisen ajoradan kesken, joista toinen oli betoni- toinen asfalttipäällysteinen. Päällysteen karkeutta ei – valitettavasti – mitattu.

Koe toteutettiin kuorma-autolla sekä vierintäkokeena ”coast down”-menetelmällä että polttoaineenkulutustutkimuksena ja sen suoritti VTT:n Tie- ja liikennelaboratorio /24/.

Vierintäkoe tehdään seuraavasti: Autolla rullataan vapaalla (kytkinpoljin pohjassa ja vaihde vapaalla) 40 m pitkä matka. Ajoanalysaattori mittaa aina 10 m matkaan kuluneen ajan 0,1 millisekunnin erottelukyvällä. Kahden peräkkäisen 10 m matkojen aikojen perusteella lasketaan hidastuvuus ja keskinopeus. Siten 40 m matkalta saadaan kaikkiaan 3 mittaustulosta. Hidastuvuus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$a = 2(l_1 \cdot t_2 - l_2 \cdot t_1) / (t_1^2 \cdot t_2 + t_1 \cdot t_2^2), \quad (14)$$

jossa  $a$ =hidastuvuus  $m/s^2$ ,  $l_1$  ja  $l_2$  ovat vierintämatkoja ja  $t_1$  ja  $t_2$  vastaavia vierintäaikoja.

Vierintävastuskerroin lasketaan kahdella eri nopeudella mitatuista hidastuvuuksista ja keskinopeuksista seuraavalla kaavalla:

$$f = (a_2 \cdot v_1^2 - a_1 \cdot v_2^2) / (g(v_1^2 - v_2^2)), \quad (15)$$

jossa  $f$ =vierintävastuskerroin,  $a_1$  ja  $a_2$  ovat hidastuvuuksia,  $v_1$  ja  $v_2$  vastaavia keskinopeuksia ja  $g$ =maan vetovoiman kiihtyvyys ( $9,81 m/s^2$ ).

Tutkimuksen tulokset vierintävastuskertoimen osalta olivat seuraavat:

*Taulukko 1. Vierintävastuskertoimet henkilö- ja kuorma-autoilla asfaltti- ja betonipäällysteellä ja päällysteiden tasaisuusarvot IRI ja IRI4.*

Ajoneuvo/IRI	Betonipäällyste	Asfalttipäällyste
Kuorma-auto	0,0176	0,0189
Henkilöauto	0,0175	0,0179
IRI	1,78	1,38
IRI4	1,14	0,85

Polttonesteenkulutusmittauksista saatiin vastaavasti seuraavat tulokset (kuva 36).

	Nopeus km/h	Betoni- päällyste	Asfaltti- päällyste	Ero %
Kuorma-auto Kuiva/kostea päällyste	50	24,7	25,0	+1,2
	80	31,6	31,1	-1,6
Kuorma-auto Märkä päällyste	50	25,2	25,6	+1,6
	80	30,4	30,8	+1,3
Henkilöauto Kostea päällyste	50	5,2	5,2	±0
	80	6,5	6,5	±0
	100	7,9	7,8	-1,3

Kuva 36. Polttonesteen kulutusmittaukset Vt 3: moottoritiellä rinnakkaisilla asfaltti- ja betonipäällysteisillä ajoradoilla /24/.

Yhteenvedona em. tuloksista voidaan todeta, että vierintävastus kuorma-autoilla betonipäällysteellä oli n. 7 % pienempi kuin asfalttipäällysteellä ja vastaavasti henkilöautoilla 2 %. Sen sijaan polttonesteen kulutusmittauksissa erot eivät olleet systemaattisia.

Tulosten tarkastelussa on otettava olosuhdetekijöinä huomioon se, että mitausajankohtana (lokakuu) lämpötila oli 0–5 astetta, joka lisää asfalttipäällysteen jäykkyyttä huomattavasti, sen ollessa moottoritiellä luonnollisesti muutenkin hyvä (taipuma suuruusluokaltaan 0,3–0,5 mm).

Betonipäällysteen makrokarkeus oli myös selvästi suurempi kuin asfalttipäällysteellä, sillä uuden betonipinnan valmistamiseen kuuluu oleellisena osana poikkiharjaus, joka aikaansaa n. 2–3 mm korkeaa karkeutta. Vastaavasti asfalttipäällyste oli erittäin tasainen eli täysin uusi liikennöimätön pinta. Vierintävastusero betoni- ja asfalttipäällysteen välillä olisi näin ollen luultavimmin ollut suurempi em. tekijät huomioon ottaen.

Kaikista edellä esitetyistä tutkimustuloksista on pääteltävissä, että päällysteen kantavuudella (taipumalla) on erittäin selvää vaikutusta vierintävastukseen ja siten myös polttoaineenkulutukseen.

*Vaikka em. tuloksiin on suhtauduttava osittain varauksella, niin päällysrakenteen kantavuuden vaikutus on niin suuri, että se on otettava huomioon raskean liikenteen polttoaineenkulutustarkasteluissa.*



## 5 POLTTOAINEENKULUTUS

### 5.1 Vierintävastuksen ja polttoaineenkulutuksen suhde

Vierintävastuksen vaikutusta polttoaineenkulutukseen määrittävät monet eri tekijät, kuten ajoneuvon ominaisuudet ja kuormitus, toimintaolosuhteet, tien kaltevuus, sää jne. Polttoaineenkulutuksen muutoksen suhdetta vierintävastuskertoimen muutokseen kuvataan muuntosuhteella  $\eta$ , joka määritetään siis seuraavasti:

$$\eta = \frac{\Delta F_c / F_c}{\Delta C_p / C_p}$$

jossa,

(16)

$\eta$  muuntosuhde  
 $F_c$  polttoaineenkulutus/matka, esim. l/100 km  
 $C_p$  vierintävastuskerroin  
 $\Delta$  muutos

Eri lähteistä kerätystä aineistosta on saatu seuraava yhteenvetotaulukko (kuva 37):

Reference	Vehicles	Test Conditions	$\eta$
Crim and McNall [7] (Ford Motor, 1974)	several cars	constant speed 48-113 km/h	0.12 to 0.37
Floyd, C. W. [8] (Firestone, 1976)	several cars	constant speed 48-113 km/h	0.17 to 0.36
Thompson and Torres [9] (EPA, 1977)	several cars	EPA cycle	<0.20>
Knight, R. E. [10] (Goodyear, 1979)	two trucks (21 and 36)	constant speed 100 km/h	<0.25>
Waters and Laker [11] (TRL, 1980)	one car	1. EEC cycle 2. constant speed 90 km/h	0.13 0.18
Salerno, F. [12] (Pirelli, 1983)	one car	computed	0.15
Gernsheim, M. [13] (Uniroyal, 1983)	several cars	constant speed 90-120 km/h	0.14 to 0.26
Mathevet, A. A. [14] (Michelin, 1983)	one car	constant speed 80 km/h	0.27
Schubert, K. et al. [15] (MAN, 1988)	2 buses (12.4 and 16)	1. constant speed 50 km/h 2. maximum speed 50 km/h and two stops/km	0.28 to 0.39 0.12 to 0.13

Kuva 37. Yhteenveto eri tutkimuksista koskien polttoaineenkulutuksen muutosta verrattuna vierintävastuskertoimen muutokseen /11/.

Muuntosuhteen  $\eta$  todetaan eri tutkimuksissa vaihtelevan välillä 0,12–0,37, mikä tarkoittaa siis sitä, että jos vierintävastus(kerroin) muuttuu 10 %, niin polttoaineenkulutus muuttuu 1,2–3,7 %. Keskimääräinen muuntosuhteen  $\eta$  arvo on n. 0,2 henkilöautoille ja 0,25 kuorma-autoille. Kuorma-autoille siten vierintävastuksen pieneneminen on hieman edullisempaa kuin henkilöautoille.



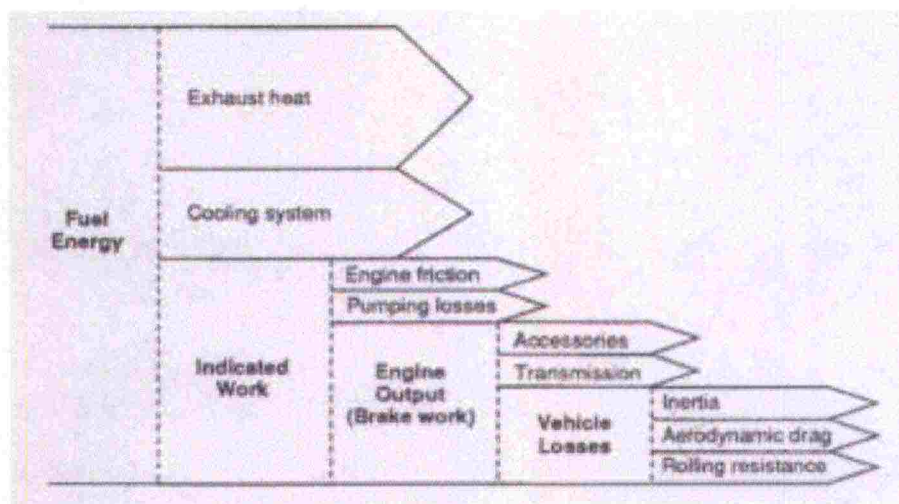
Edellisten lisäksi on kirjallisuudessa mm. seuraavanlaisia tietoja:

Muuntosuhde $\eta$	Huom	Lähde
0,10–0,20	ha	/9/
0,10–0,30	ka	/9/
0,3–0,4	pitkät maantiematkat	/25/
0,20–0,25	paikallisliikennöinti	/25/
0,125	kaupunkibussit	/25/

## 5.2 Polttoaineenkulutukseen vaikuttavia muuttujia

### 5.2.1 Polttoaineenkulutuksen koostumus

Ajoneuvojen polttoaineen käyttötärpeeseen kulutukseen vaikuttavat monet eri tekijät, joiden keskinäistä suhdetta kuvataan kaaviomaisesti seuraavassa kuvassa 38.



Kuva 38. Ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen vaikuttavia tekijöitä /9/

Kuvasta käy havainnollisesti esille seuraavat tunnusluvut:

- pakokaasuihin ja jäähdytysjärjestelmään kuluu noin puolet polttoaineen sisältämästä energiasta
- työhön kuluu myös noin puolet energiasta, joka puolestaan jakaantuu seuraaviin häviöihin ja työhön:
  - moottorin kitkahäviöt
  - pumppaushäviöt
  - lisälaitteet
  - voimansiirto
- sekä
  - ajoneuvohäviöt
    - inertia
    - ilmanvastus ja
    - vierintävastus

Michelin-rengastehdas esittää yhteenvedona eräiden polttoaineenkulutuksen osatekijöiden keskinäisistä suhteista vastaten noin puolta polttoaineen kokonaiskulutuksesta seuraavaa /26/:

Osatekijä, %	Henkilöautot	Kuorma-autot
Ilmanvastus	65	50
Sisäiset vastukset (voimansiirto yms.)	15	10
Vierintävastus	20	40

Huom. Ajonopeus 100 km/h

### 5.2.2 Renkaan ominaisuudet

Oikean rengaspaineen merkitys on myös huomattava myös vierintävastuksen ja siten polttoaineenkulutuksen kannalta. Erityisen haitallista on ajaminen liian alhaisella rengaspaineella: 20 % liian alhainen rengaspaine lisää polttoaineenkulutusta n. 10 % ja lyhentää renkaan kulutuserroksen ikää 15 % /27/.

Ehkä yllättävimpiä vierintävastukseen ja sen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on renkaiden, erityisesti kulutuserroksen paksuuden vaikutus. Dunlop-rengastehtaan ilmoituksen mukaan 50 % vähennys uuden renkaan kulutuserroksen paksuudessa vähentää vierintävastusta 20 % (polttoaineenkulutuksen vähennykseksi saadaan siten muuntokertoimella 0,25 5 %) /28/.

Samansuuruiseen vähennykseen johtavaan tulokseen on tullut Firestone-rengastehdaskin /29/ jonka tutkimusten mukaan polttoaineenkulutus raskaiden ajoneuvojen tapauksessa pienenee huomattavasti renkaiden kulutuspinnan kulumisen mukaan, maksimissaan n. 6,6 %. Pieneneminen on voimakkainta 30–50 % kuluneisuuden alueella, jonka jälkeen saavutettavat säästöt ovat pieniä (kuva 39).

Tässä ei ole käsitelty mahdollisia negatiivisia vaikutuksia, joita matalalla urasyvyydellä on!



Kuva 39. Renkaan kuluneisuuden vaikutus raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutuksen vähentymiseen Firestone-rengasvalmistajan tutkimusten mukaan /29/.

## 6 VIERINTÄVASTUKSEN MITTAUSMENETELMÄT

### 6.1 Mittausmenetelmiä koskevat yleiset huomiot

Paras tapa liikkeessä olevan renkaan energiankulutuksen mittaamiseksi on mitata renkaan vierintävastusta. Mittaukseen sisältyy lukuisia tekijöitä, jotka on syytä ottaa huomioon ennen tutkimusten aloittamista. Eri menetelmät ovat käyttökelpoisia riippuen tutkimuksen kysymyksenasettelusta, esim. onko kysymyksessä renkaiden, päällystetyyppien yms. muuttujien vai absoluuttisten vierintävastusvoimien ja -kertoimien määrittäminen.

Mittauksessa huomioita tekijöitä ovat mm. seuraavat:

- Vierintävastusvoiman suuruus muihin renkaaseen kohdistuviin voimiin verrattuna on pieni, joten hyvän tarkkuuden saavuttaminen mittauksissa on vaikeaa.
- Ilmanvastus ja laakerivastukset ovat voimakkaasti nopeudesta riippuvia.
- Renkaan iällä on merkitystä siten, että aivan uusi rengas (ajettu alle 100–200 km) on vielä "epästabiili" ennen kuin renkaan materiaali ja rakenne "asettuu" pysyvämpään muotoon johtuen sidoksien murtumisesta, jännitysten tasaantumisesta ja jälkivulkanoitumisesta. Uudet renkaat on ajettava sisään ennen kokeita.
- Suuren tarkkuuden saavuttamiseksi vierintävoiman mittaamisessa renkaan tulisi mittaustilassa olla a) vapaasti pyörivä (ei vääntöä), b) ilman luistoa ja c) ilman sortoa.
- Vierintävastusvoimaan vaikuttaa renkaan mittaustilan lämpötila, joten on päätettävä tehdäänkö mittaukset a) vakioämpötilassa, jolloin mittaustulokset on saatava heti renkaan vaihdon jälkeen vai b) vakiotilaan ajossa asettuneessa lämpötilassa.
- Renkaan ilmanpaine vaihtelee myös lämpötilan mukaan. On päätettävä tehdäänkö mittaukset a) vakioaineessa (renkaan painetta voitava säätää ajossa) vai b) vallitsevassa paineessa.
- Ulkoisia tekijöitä, jotka suuresti vaikuttavat mittaustuloksiin ja on niistä eliminointava tai vakioitava, ovat mm. tuulensuunta ja tien pituus- sekä sivukaltevuus.

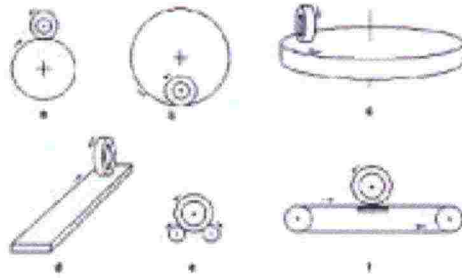
### 6.2 Laboratoriokokeet

Sisätilassa, laboratoriossa tehtävät tutkimukset tarjoavat periaatteessa hyvät mahdollisuudet toiminnallisten olosuhteiden hallintaan ja vakiointiin. Sen sijaan luonnonmukaisuuden (päällysteen pinta ja sen karkeus yms.) on vaikeaa ja vain yleensä vain todellisissa tieolosuhteissa mahdollista.

Laboratoriokokeet voidaan niiden tekotavan mukaan jakaa seuraavasti (kuva 40):

- rumpukokeet
- pyörivä levy (rengas paikallaan)
- edestakaisin liikkuva alusta
- kaksoisrullat
- hihna-alusta





Kuva 40. Periaatekuvat vierintävastuksen mittaamisesta laboratoriossa /30/.

Kuten kuvasta 40 voidaan päätellä vaikeuttaa laboratoriomittauksia seuraavat tekijät:

- ulkopuolinen rumpu > rummun kaarevuussäde ja kosketuspinnan muoto
- sisäpuolinen rumpu > vaikea suunnitella ja rakentaa
- edestakaisin liikkuva alusta > mittaussnopeus ja -saavutus (mitattu matka) alhainen
- kaksoisrullat > rullien pieni säde aiheuttaa epätavallisen suuren ja epäluonnollisen renkaan deformaation todelliseen tilanteeseen verrattuna ja tulos on siten epäluotettava
- yleinen ongelma kaikissa em. tapauksissa on normaalin päällysteen rakentamisen mahdottomuus (sisärumpua on käytetty mm. päällysteiden kulutuskokeisiin Saksassa).

### 6.3 Kenttäkokeet tiellä

Kenttäkokeet tarjoavat realistisimman koetilanteen olosuhteiden suhteen, mutta samalla tulosten hajonta kasvaa, koska kontrolloimattomia muuttujia ovat pahimmassa tapauksessa tuulen suunta ja voimakkuus, tien pituuskaltevuus, tien poikkikaltevuus ja lämpötila.

Pääasialliset mittaussuunnitelmat ovat seuraavat:

a. Instrumentoitu ajoneuvo tai traileri

Vierintävastus mitataan voimana tai vääntönä ajoneuvon pyörältä, akselilta tai kardaanilta. Menetelmän epävarmuustekijänä on mitattavan voiman pienuus muihin voimiin verrattuna ja se on herkkä mm. sekä sisäisille että ulkoisille muuttujille (pyörän suuntaus, kitkat, ajoneuvon liiketilän muutokset kiihdytys ja jarrutus, tien kaltevuudet, lämpötila tuuli yms.) Esim. kuorma-auton renkaan mittauksissa 1 mrad (3,4') muutos on n. 30 N eli n. 15 % koko vierintävastusvoimasta.

b. Coast-down -menetelmä

Menetelmässä mitataan ajoneuvon hidastuvuutta eri nopeuksilla, kuten on esitelty edellä VTT:n tekemien asfaltti- ja betonipäällysteen vierintävastus- ja polttoaineenkulutuskokeiden avulla. Mittaustuloksiin sisältyvien ilmanvastus- ja laakerikitkojen arvioiminen on hieman hankalaa.

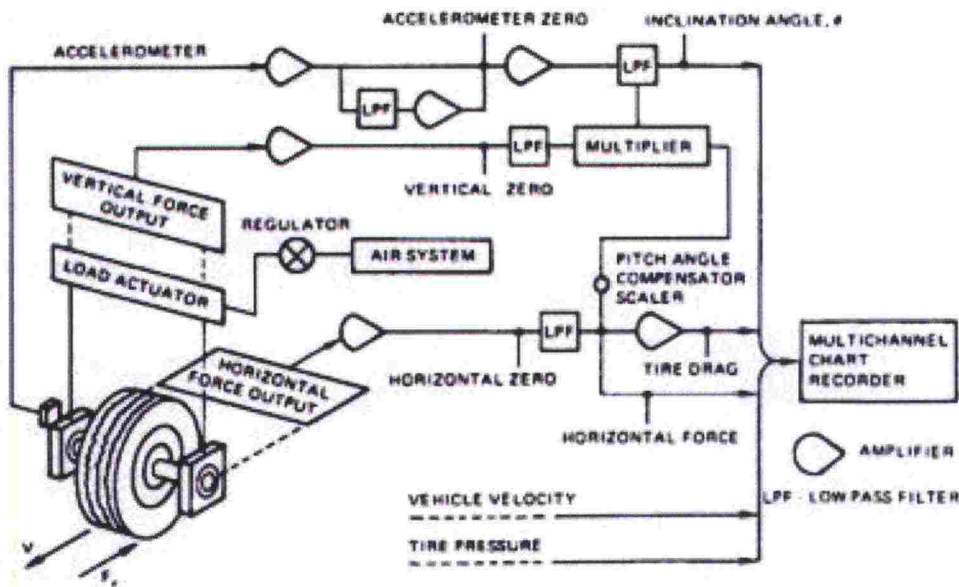
c. Polttoaineenkulutust mittaukset

Polttoaineenkulutuksen mittaamiseen perustuva menetelmä katsotaan yleensä epävarmimmaksi ja käyttö tulee kysymykseen vain vertailevissa tutkimuksissa.

d. Dynamometrin avulla tapahtuva mittaaminen (ajoneuvo tai traileri)

Tämän menetelmän katsotaan tarjoavan parhaan kompromissin laboratorio- ja kenttämittausten välillä. Osa ulkoisista muuttujista voidaan poistaa tai vähentää niiden vaikutusta huomattavasti esim. mitattavan pyörän koteloinnilla. Esimerkkinä tällaisesta menetelmästä on aikaisemmin esitelty belgialainen CRR:n trailerityyppinen mittausvaunu.

Yleistetyssä muodossa dynamometrinen mittaustapa on esitetty seuraavassa kuvassa 41.



Kuva 41. Kaavakuva vierintävastusvoiman ja -rtoimen mittaamisesta dynamometrisellä menetelmällä /30/.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

### 7.1 Päällysteen pinnan kuvaaminen ja mittaaminen

Päällysteen pinta ja sen muoto on luonnollisesti kolmiulotteinen, mutta käytännössä tämän mittaaminen ja kuvantaminen on erittäin vaikeaa. Käytännössä ainoa tapa on käyttää volymetristä ns. Sand Patch-menetelmää, sillä se mittaa pinnan karkeuden sisältämän tilavuuden.

Käytännön mittauksen kannalta mahdollisia menetelmiä ovat pinnan pituussuuntaisen (tai tarvittaessa poikittaissuuntaisen) profiilin mittaaminen joko nopeilla laseranturitekniikkaan perustuvilla menetelmillä tai staattisilla menetelmillä. Nopeiden, PTM-tyyppisten laserlaitteiden etuna on nopeus – käytännössä liikenteen nopeus – ja toisaalta rajoittavana tekijänä laseranturin näytteenottotaajuus eli käytännössä saavutettava mittauspisteiden pienin väli. Teoriassa 1 mm:n mittaussväli nopeudella 80 km/h (22,22 m/s) saavutetaan siis näytteenottotaajuudella 22 kHz, mutta käytännössä vaaditaan suurempi taajuus. Makrokarkeuden alarajalla (0,5 mm) vaadittaisiin siis teorias-  
sa 90 kHz:n näytteenottotaajuus.

Staattisissa mittauksissa voidaan saavuttaa helposti vaadittu näytteenottoväli – 0,25 mm – mutta toisaalta mittaus on hidasta.

Suomessakin ovat käytettävissä kaikki tarpeelliset mittauslaitteet.

Tien pituussuuntaisen profiilin määrittämisessä käytetään tien karkeuden, epätasaisuuden ja tien geometrian aallonpituuteen perustuvaa jaottelua. Tämän jaottelun tarkoituksena on kuvata pinnan laadun aiheuttamia seurauksia, kuten kitkaa, ajomukavuutta, valonheijastusominaisuuksia jne.

Pinnan ominaisuuksia kuvataan Suomessa nykyään tasaisuuden osalta IRI- ja pinnan karkeuden osalta RMS-luvuilla. Muita käytössä olevia tunnuslukuja ovat pinnan profiilista tekstuurin keskisyvyttä kuvaavat tunnusluvut.

IRI-luku ilmoittaa keskimääräisen arvon tietyn mittausosan matkalle. Sen puutteena on siten se, että siitä ei ilmene ko. lukuarvoon vaikuttavien aallonpituuksien ja amplitudien koostumus. Näin ollen kaksi lukuarvoltaan samalaista tieosuutta voivat muilta ominaisuuksiltaan olla täysin erilaisia, kuten esim. asfaltti- ja betonipäällysteiden vertailussa helposti tapahtuu.

Lähes yksikäsitteisen kuvan tien pituussuuntaisen epätasaisuuden koostumuksesta tarjoaa PSD-tunnusluku/spektri (Power Spectral Density), jonka spektrikuvaaja osoittaa esim. amplitudien osuuden eri aallonpituuksilla. Käytännössä se siten kertoo esim. sen, koostuuko saatu tunnusluku pitkien vai-  
ko lyhyiden aaltojen vaikutuksista. Lisäksi PSD:n etuna on se, että sillä voidaan tarkastella koko aallonpituusaluetta mittaustarkuuden puitteissa, esim. 1 mm-50 m, mikä ei ole mahdollista IRI:n avulla. Puutteena on se, että siitä ei ilmene erilaisten epätasaisuuksien sijaintia.

Rajoittavana tekijänä PSD:n käytössä on se, että lähtökohdiltaan se on spektri, jota yksikäsitteisesti ei voida kuvata yhdellä tunnusluvulla. Tosin



olemassa on jo ehdotus PSD:n käytöstä tien epätasaisuuden luokittelussa IRI:n tapaan.

Koska PSD tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet tien pituussuuntaisen epätasaisuuden parempaan ymmärtämiseen ja käyttöön erilaisissa tarkasteluissa, olisi harkittava sen mittaamista normaalissa mittaustoiminnassa. Tämän tekee mahdolliseksi se, että PSD:n mittaamiseen voidaan käyttää jo olemassa olevia nopeita mittauslaitteita (PTM-autot yms.), ainoastaan tulosten tallennukseen on tehtävä muutoksia.

## 7.2 Vierintävastuksen taloudelliset vaikutukset

Ajoneuvojen energiankulutus muodostuu eri komponenteista, kuten lämpöhäviöistä ja jäähdytyksestä, moottorin, voimansiirron ja lisälaitteiden käyttöhäviöistä sekä inertiasta, ilmanvastuksesta ja vierintävastuksesta. Vierintävastuksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta on n. 20–30 %. Tämä on siis se osuus, johon voidaan vaikuttaa mm. päällysteen pinnan laadulla. Luonnollisesti siihen vaikutetaan voimakkaasti mm. rengasteknisin tekijöin, joiden vaikutuksesta renkaan vierintävastus on viimeisten parin vuosikymmenen aikana pienentynyt n. kolmanneksen.

Vierintävastuksen ja polttoaineenkulutuksen välillä on seuraava yhteys: Vierintävastuksen 10 % muutos vastaa polttoaineenkulutuksen muutoksessa n. 1–4 %, keskiarvot henkilöautoille ovat 2 % ja kuorma-autoille 2,5 %.

Kansantaloudellista säästöpotentiaalia kuvaavat seuraavat luvut: Polttoaineenkulutuksen pienentäminen 1 %:lla (= vierintävastuksen pienentäminen 4–5 %:lla) vähentää polttonestekustannuksia raskaan liikenteen osalta 6/14 M€ (veroton/verollinen hinta) ja henkilöautoliikenteessä vastaavasti 5/17 M€. Vastaavasti vierintävastuksen pienentäminen 1 %:lla pienentää polttoaineenkulutusta 0,2–0,25 % eli kustannusten alentuminen on raskailla ajoneuvoilla 1,2/2,8 M€ ja henkilöautoilla vastaavasti 1/3,4 M€. Vierintävastuksen pienentäminen vaikuttaa hieman edullisemmin raskaaseen liikenteeseen kuin henkilöautoliikenteeseen.

## 7.3 Vierintävastus ja päällysteen pituusprofiili

Päällysteen pituusprofiililla tarkoitetaan tässä mikro-, makro- ja megakarkeutta sekä epätasaisuutta (IRI).

Mikrokarkeudella tarkoitetaan kiviaineksen pinnan karkeutta. Se ilmenee ajaessa kitkana ja siihen vaikuttaa voimakkaasti säätila: märällä tienpinnalla ko. vierintävastuskomponentti (van der Plass-voimat) häviää. Mikrokarkeus on tarpeellinen osa liikenneturvallisuutta ajatellen ja sitä ei ole päällysteteknisin keinoin syytä pienentää. Mikrokarkeuden osuus kokonaisvierintävastuksesta on arviolta 2–3 % (kuiva tienpinta).

Makrokarkeudella tarkoitetaan kiviainesrakenteen muodostamaa karkeutta aallonpituusalueella 0,5–50 mm. Sen vaikutus vierintävastukseen syntyy renkaan muodonmuutoksista, hysteresiksestä, joka synnyttää renkaaseen lämpöhäviöitä. Makrokarkeuden vaikutus vierintävastuksesta on maksimis- saan n. 20 % ja keskimäärin eri tutkimusten perusteella n. 10 %.

Makrokarkeus on se komponentti, joka on tyypillistä suomalaisille nastarengasliikenteen kuluttamille päällysteille. Makrokarkeuden vähentäminen on mahdollista päällysteteknisin keinoin valitsemalla maksimiraekooltaan nykyistä hienompimassaisia päällysteitä. Toisaalta karkeammalla päällyste-koostumuksella saadaan parempi kulutuskestävyys nastarengasliikennettä vastaan. Makrokarkeudella on myös suotuisia vaikutuksia, joten sitä ei ole syytä kokonaan poistaa, vaan vähentää tarpeettomin osin.

Megakarkeuden aallonpituusalue 50–500 mm sijoittuu renkaan kosketuspinnan alueelle (henkilöautolla 10 cm ja kuorma-autoilla 30 cm) ja se vaikutus esiintyy mm. ajoneuvojen jousituksen tekemänä työnä. Sillä ei ole hyödyllisiä vaikutuksia. Suuruusluokaltaan sen vaikutus vierintävastukseen on n. 12 %.

Megakarkeutta voidaan minimoida vain päällyste- ja päällysrakenneteknisin keinoin, joita ovat mm. massan stabiliteetti, alustan kantavuus ja homogeenisuus, asfalttimassan lajittumisominaisuudet, jyräystekniikka yms.

Epätasaisuuden (IRI) aallonpituusalue on 0,5–30/50 m, joka usein jaetaan vielä seuraaviin osiin: 0,5–3 m (lyhyet), 3–10 m (keskipitkät) ja 10–40 m (pitkät). Suomessa on käytössä uusien päällysteiden laadunarvostelussa lisäksi ns. IRI4, joka edustaa aallonpituusaluetta 0,5–4 m. IRI4:n tarkoituksena on kuvata sitä aallonpituusaluetta, johon asfaltin levitystyössä on mahdollista vaikuttaa. Epätasaisuuden vaikutus vierintävastukseen on keskimäärin 10 %.

Erilaiset tarkastelut osoittavat, että vierintävastukseen vaikuttaa erityisesti lyhyet aallot eli aallonpituusalue 0,5–3 m. Tämä merkitsee sitä, että nykyisin käytettyä IRI-tunnuslukua paremmin vierintävastusta kuvaisi IRI3(4) tunnusluku. IRI on alun perin kehitetty kuvaamaan ajoneuvojen kuljettajien ja matkustajien ajomukavuutta, johon se onkin hyvä apuväline. Käytännössä molemmat tunnusluvut ovat helposti laskettavissa nykyisillä mittausmenetelmillä.

Tien epätasaisuuteen voidaan vaikuttaa sekä päällysrakenne- että päällysteteknisin keinoin.

#### 7.4 Päällystetekijöiden vaikutuspotentiaali Suomessa

Päällyste- ja päällysrakenneteknisin keinoin voidaan vaikuttaa päällysteen pituussuuntaiseen epätasaisuuteen ja karkeuteen. Meille tyypillisiä ovat karkeat nastarengasliikenteen kuluttamat päällysteet ja luonnollisesti myös päällysteiden epätasaisuus.

Edellä (6.3) esitetyt tulokset kuvaavat eri tutkimuksissa saatuja arvoja, jotka perustuvat laajaan kirjoon erilaisia päällysteitä. Suomen olosuhteissa liikutaan päällysteiden laatutasossa normaalisti ”hyvällä” tasolla, jolloin täysimääräisesti em. potentiaalia vierintävastuksen pienentämisessä ei ole ole-massa.

Päällysteiden karkeuden osalta eri tutkimukset osoittavat, että pinnan (makro)karkeuden muutos 1 mm (Texture Depth, Sand Patch) vaikuttaa vierintävastukseen n. 12 % ja polttoaineenkulutukseen vastaavasti 2,4/3 % (henkilö/kuorma-autot). Suomessa nastarengasliikenteen karkeuttamien päällyste-



teiden karkeutta ei ole systemaattisesti mitattu, mutta valistunut arvaus lie-  
nee 1–3 mm. Vaikutus polttonesteen kulutuslisäykseen on siten n. 4–5%.

IRI:n vaikutus vierintävastukseen on henkilöautoilla keskimäärin 4 %/1 IRI-  
yksikkö ja raskailla ajoneuvoilla vastaavasti 2,5 %. Polttoaineenkulutukseksi  
muutettuna tämä merkitsee 0,8/0,5 % vaikutusta 1 IRI-yksikön muutosta  
kohden. Päälysteiden ominaisuuksien muuttamisella voidaan vaikuttaa ta-  
saisuutta parantavasti, joskin parantamismahdollisuudet normaalitiestöllä  
ovat suuruusluokkaa 1–2 mm/m (IRI).

Päälysteiden megakarkeudella on vaikutusta vierintävastukseen ja polttoai-  
neenkulutukseen, sen osoittavat esim. heilahduksenvaimentimien lämpene-  
minen – ja siten energiahäviöt – heilahdusliikkeessä. Suuruusluokaltaan se  
on eri tutkimuksissa osoittautunut olevan samaa suuruusluokkaa kuin mak-  
rokarkeuskin. Ongelmana arvioinnissa Suomen oloissa on se, että meillä ei  
ole sitä mitattu.

Yhteenvetona voidaan arvioida, että vierintävastuksen pienentämiseen liitty-  
vien toimenpiteiden potentiaaliset vähentämismahdollisuudet Suomen olo-  
suhteissa ovat polttoaineenkulutuksen osalta n. 6–10 %. Toisaalta tarvittavat  
toimenpiteet lisäävät päälystämisen kustannuksia todennäköisen nastaren-  
gaskulutuksen kasvun vuoksi. Sitä voitaneen kompensoida muulla päälys-  
tesuunnittelulla, kuten päälysteen hienomman raekoostumuksen mahdolls-  
taman kulutuserroksen ohentamisen avulla.

## 7.5 Kantavuuden vaikutus vierintävastukseen

Päälysteen jäykkyyden vaikutus vierintävastukseen on tullut aika ajoin eri  
tutkimuksissa verrattaessa asfaltti- ja betonipäälysteitä keskenään. Betoni-  
päälysteen alhaisemman vierintävastuksen on esitetty johtuvan päälysteen  
pienestä taipumasta. Samansuuntaisia tuloksia on saatu myös muiden pääl-  
lystetyyppien vertailumittauksissa, mutta varsinaista teoreettista pohjaa mit-  
taustulosten tueksi ei ole olemassa. Mittaustulosten perusteella polttones-  
teen kulutuserot betonipäälysteen ja asfalttipäälysteen välillä ovat suuruus-  
luokkaa 10 % ja sorapäälysteeseen verrattuna vastaavasti jopa 18 %. Tu-  
lokset vaikuttavat suurilta, ja niihin voi sisältyä myös muiden päälysteen  
pintatekijöiden vaikutuksia.

Tässä raportissa on esitetty hypoteesi ja energiahäviölaskelmat kantavuu-  
den vaikutuksesta vierintävastukseen. Esitetyn teoreettisen mallin pohjana  
on oletamus siitä, että raskas pyöräkuorma tekee työtä päälysrakenteen  
kokoontuustamisessa. Tehty työ muutetaan tehoksi, joka tarvitaan ajoneu-  
von liikkuessa "painumasuppilossa" syntyvän vastuksen voittamiseen.

Käytännössä päälysteen jäykkyys vaikuttaa ainoastaan raskaan liikenteen  
vierintävastukseen.

## 7.6 Vierintävastukseen vaikuttavat muut tekijät

Vierintävastukseen vaikuttavia muita tekijöitä ovat renkaan ominaisuudet,  
ajo-olosuhteet ja päälysteen laatu.



Renkaan ominaisuudet ovat tärkeä tekijä, sillä renkaan valmistajalla on suuret mahdollisuudet vaikuttaa siihen. Renkaiden kehityksen eräs painopiste on juuri vierintävastuksen alentaminen. Siinä on onnistuttukin hyvin, ja nykyaikaiset renkaat – sekä henkilö- että kuorma-autorenkaat – ovat vierintävastusominaisuuksiltaan parantuneet kymmeniä prosentteja.

Ajo-olosuhteet vaikuttavat siten, että nopeudella ja renkaan lämpötilalla ja ulkoilman lämpötilalla on tietty tasapainoasema. Periaatteellisenä tuloksena on se, että vakioituissa olosuhteissa ajonopeuden lisääminen kasvattaa vierintävastuskerrointa.

Edelliseen liittyen myös renkaan ilmanpainetta lisättäessä vierintävastus pienenee.

Normaaleista liikennetilanteista poikkeavissa ajo-olosuhteissa, kuten pehmeässä hiekassa, ja lumessa vierintävastus kasvaa huomattavasti, vaikuttavina tekijöinä ovat lisäksi renkaan dimensiot ja renkaan ilmanpaine.

## 7.7 Suositus mittausmenetelmistä

Nykyaikaisilla palvelutasomittausautoilla voitaisiin normaalin mittaustoiminnan yhteydessä kerätä aineistoa, jota voidaan käyttää erilaisiin päällysteiden pintaominaisuuksien vaikutuksia kuvaaviin tarkasteluihin.

Vierintävastukseen vaikuttavien tekijöiden inventoimiseksi tulisi mittausmenetelmiä kehittää seuraavasti:

### 1. Jatkuva pituusprofiilimittaus

Pituusprofiili mitataan mahdollisimman suurella mittaustiheydellä. Käytännössä tämä tarkoittaa n. 1–2 mm mittaustiheyttä.

### 2. Laskettavat suureet

#### a. IRI ja IRI4

IRI4:llä tarkoitetaan sellaista IRI-menetelmällä mitattua tunnuslukua, joka pitää sisällään vain 0,5–4,0 m aallonpituudet, ts. pitkien aaltojen vaikutus on jätetty pois.

IRI4:ää käytetään vierintävastuskertoimen laskentaan.

#### b. Makro- ja megakarkeus

Profiilista lasketaan RMS (0,5–50 mm) ja RMS(50–500 mm), joita käytetään karkeusvaikutuksen arviointiin vierintävastuksen laskennassa.

#### c. PSD-spektri

PSD-spektri tarjoaa parhaan lähtökohdan päällysteen epätasaisuuden koostumuksen – aallonpituus ja amplitudi – vaikutuksen arvioimiseksi.

d. Sivu- ja pituuskaltevuus

Kaltevuuden mittaamisessa riittää n. 1–5 m keskiarvo. Tämä tieto on tarpeellinen laskettaessa ajoneuvon kokonaisvastuksia, johon tien geometria vaikuttaa.

e. Kantavuusmittaustieto tierekisteristä.

Tien kantavuudella (jäykkyydellä, taipumalla) on sekä teoreettisten että vertailututkimusten perusteella vaikutusta myös vierintävastukseen. Tämä tieto on saatavissa tierekisteristä kantavuusmittausten avulla.

## 8 KIRJALLISUUSLUETTELO

Mäkelä, K., Tuominen, A. ja Pääkkönen, E., Suomen liikenteen päästöjen laskentajärjestelmä LIPASTO 2002, VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Tutkimusraportti RTE 1378/03, Espoo 2003.

Klempau, F., Development of a friction prediction system, 2<sup>nd</sup> International Colloquium on vehicle tyre road interaction, Florence, Feb. 23<sup>rd</sup> 2001.

Chavet, J. et al., Optimization of surface characteristics, Surface Characteristics, Technical Committee Report No 1, XVIIIth World Road Congress, Brussels, 13-19 Sept. 1987.

Sandberg, U., Influence on road surface texture on traffic characteristics related to environment, economy and safety, A state-of-the-art study regarding measures and measuring methods, VTI notat 53A-97, Linköping, 1997.

Characterisation of pavement texture utilising surface profiles-Part 1, Determination of Mean Profile Depth, ISO Standard 13473-1.

Sayers, M., Development, Implementation, and Application of the reference Quarter-car simulation, STP 884, ASTM, Baltimore 1985.

Sayers, M., Karamihas, S., The little book of profiling, the University of Michigan, September 1998.

Ehdotus PSD-luokituksen käytöstä tien tasaisuusarvostelussa.

LaClair, T., Tire rolling resistance, its impact on fuel economy, and measurement standards, CEC Workshop on fuel efficient tires, California energy commission.

Developing tires with less rolling resistance for better fuel economy, Good-year tire and rubber company, Sandia national Laboratories, April 2001.

Descornet, G., Road-surface influence on tire rolling resistance, Surface characteristics of roadways, ASTM STP 1031, Philadelphia, USA, 1990.

Xiao-Pei Lu, Effects of road roughness on vehicular rolling resistance, ASTM STP 884, Philadelphia, USA, 1985.

Cenek, P.D., Jamieson, N.J. & Towler, J.I., The influence of texture depth on skidding resistance, Opus central laboratories and Transit New Zealand.

McLean, J., Foley, G., Road surface characteristics and condition: effects on road users, Research Report ARR 314, South Victoria, Australia, Jan. 1998.

duPlessis et al., Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface characteristics, Surface characteristics of roadways, ASTM STP 1031, Philadelphia, USA, 1990.

Sandberg, U., Road macro- and megatexture influence on fuel consumption, ASTM STP 1031, Philadelphia, 1990.



Friedrich, A., Fuel saving potential from low rolling-resistance tires, Umweltbundesamt UBA), Germany, 2003.

Volvo Powertrain corp.

Cenek, P., Jamieson, N. and Ball, G., Effect of pavement deflection on rolling resistance of commercial vehicle tyres. Paper presented to the 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on Pavement Characteristics, Christchurch, Sept. 1996.

Study adds fuel savings to benefits of concrete highways, National Research Council, Canada, Oct. 2000.

Zaniewski, J. et al., Vehicle operating costs, fuel consumption and pavement type and condition factors, US DoT, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/PL/82/001, 1982.

Botterill, R. and Bowyer, D., Estimation of the effects of road roughness on fuel consumption. Final report to NERDDC. Australian Road Research Board, Contract Report TE 040 585, 1991.

Ramshaw, J. , Williams, T., The rolling resistance of commercial vehicle tyres, TRRL, Supplementary Report 701, 1981.

Kallio, M., Polttonesteenkulutus betoni- ja asfalttipäällysteellä, Tutkimusraportti 72, VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, Espoo, 1992.

Hidde, J., Janajreh, I., Advancements in Rolling resistance of truck tires, The third annual clean heavy-duty vehicles: Creating the road map for advanced technologies and fuels, Feb. 19 - 21, 2003, Arizona.  
Michelin-Site corporate

Fuel saving tips that make cents, BCAA, 2003.

Striking the balance, Dunlop- Driver Adviser-Tyre Technology, 2003.

Tread life and fuel savings, Firestone, 2003.

Methods and equipment for rolling resistance and measurement, European tire school, Leonardo da Vinci programme, 1999.

## 9 KUALUETTELO

Kuva 1. Päällysteen pinnan 3-ulotteinen profiili /2/

Kuva 2. Pituussuuntaisen epätasaisuuden luokittelu ja vaikutukset /3/

Kuva 3. Epätasaisuuden ja karkeuden eri lajit kaavamaisesti esitettynä /4/

Kuva 4. Päällysteen makrokarkeus ja siitä mitattu MPD (Mean Profile Depth=Profiilin keskisyvyys) mitattuna laserinstrumentilla 0,4 mm välein /4/.

Kuva 5. IRI:n mittauksessa käytetyn ¼-ajoneuvomallin parametrit ja tien epätasaisuuteen perustuva ns. siirtofunktio (dimensioton kerroin) /6/.

Kuva 6. Kaksi todellista pituusprofiilia ja niistä lasketut IRI-arvot, jotka teiden erilaisista profiileista (Site 4 on betonipäällysteinen ja Site 7 on asfalttipäällysteinen tie) huolimatta on käytännöllisesti katsoen sama /7/.

Kuva 7. Edellisen kuvan esimerkin perusteella laskettu pituusprofiilin pystysiirtymän PSD /7/.

Kuva 8. Kaltevuuden ja aaltoluvun perusteella kuvan 6 aineistosta laskettu PSD /7/.

Kuva 9. Esimerkki teiden luokittelusta päällysteiden pystysuuntaisen epätasaisuuden Power Spectral Densityn (PSD) avulla /8/.

Kuva 10. Renkaan vierintävastuksen osakomponentit /9/.

Kuva 11. Rengasteknisten muuttujien vaikutuksia renkaan vierintävastukseen /10/.

Kuva 12. Belgian tietutkimuslaitoksen CRR kehittämä vierintävastuksen mittaamiseen rakennettu neljännesajoneuvo /11/.

Kuva 13. Vierintävastusta mittaavan vedettävän perävaunun periaatekuva /11/.

Kuva 14. Mikro- ja makrokarkeuden synnyttämät mekanismit tienpinnan ja renkaan kulutuspinnan välillä /13/.

Kuva 15. Neljännesajoneuvon heilahduksenvaimentimeen kohdistuvat voimat renkaan ylitettäessä megakarkeuden tai epätasaisuuden luokkaa olevan esteen /13/.

Kuva 16. CRR:n vedettävällä vierintävastuksen mittausvaunulla saatuja tuloksia profiilin keskisyvyyden TD (Sand Patch -menetelmä) ja vierintävastuskertoimen välisestä yhteydestä /11/.

Kuva 17. Yhteenvedo eräistä profiilin keskisyvyyden ja vierintävastuksen välisistä riippuvuuksista /14/.

Kuva 18. Yhteenveto IRI:n vaikutuksesta vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen.

Kuva 19. Päällysteen epätasaisuuden QI ( $QI = n \cdot 13 \cdot IRI$ ) ja vierintävastuskertoimen välinen yhteys henkilöautoilla /22/.

Kuva 20. Päällysteen epätasaisuuden QI ( $QI = n \cdot 13 \cdot IRI$ ) ja vierintävastuskertoimen välinen yhteys kuorma-autoilla /15/.

Kuva 21. CRR:ssä vedettävällä vierintävastuksen mittausvaunulla tehtyjen tutkimuksen tuloksia, joissa verrataan oktaavialueittain karkeuden ja epätasaisuuden korrelaatiota vierintävastukseen /11/. Katkoviiva kuvaa tilannetta, jossa aineistosta on poistettu betonipäällyste, jossa oli poikittainen timanttisahausta pintakäsittelyä.

Kuva 22. Aallonpituuden ja polttoaineenkulutuksen välinen korrelaatio henkilöautolla (Volvo) tehdyssä tutkimuksessa /16/.

Kuva 23. Yhteenveto eri tutkimuksista makro- ja megakarkeuden sekä epätasaisuuden vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen /4/.

Kuva 24. Micheliin rengastehtaan ilmoittama vierintävastuksen alentumistrendi vuosien 1980 2000 aikana /9/.

Kuva 25. Kuorma-autojen vetävien ja ohjaavien pyörien renkaiden vierintävastuskertoimia saksalaisen tutkimuksen mukaan /17/.

Kuva 26. Henkilöautojen kesä- ja talvirenkaiden vierintävastuskertoimia saksalaisen tutkimuksen mukaan /17/.

Kuva 27. Ajonopeuden vaikutus henkilöauton tyypiseen renkaaseen erilaisilla ajopinnoilla siten, että lämpötila on vakioitu (ilma  $30^{\circ}\text{C}$  ja rengas  $50^{\circ}\text{C}$ ) /11/.

Kuva 28. Ajonopeuden vaikutus vyö- ja ristikudosrenkaiden vierintävastuskertoimeen tasaisella tienpinnalla normaalikuormituksella ja -rengaspaineella /18/.

Kuva 29. Ajonopeuden vaikutus vierintävastuskertoimeen erilaisilla ha- ja ka-renkailla ja päällystetyypeillä /18/.

Kuva 30. Teoreettiseen tarkastelu perustuva nopeuden vaikutus vierintävastuksen eri komponenttien suuruuteen ja keskinäiseen suhteeseen /12/.

Kuva 31. Vierintävastuskertoimen ja renkaan lämpötilan välinen riippuvuus, joka noudattaa kaavaa (5) sovitettaessa lämpötilaksi  $T_0 = 47^{\circ}\text{C}$  /11/.

Kuva 32. Renkaan ilmanpaineen ja pinnan laadun vaikutus vierintävastuskertoimeen /18/.

Kuva 33. Heilahduksenvaimentimien energiahäviöt dynaamisessa penkkiteistissä kolmella eri aallonpituusalueella ja eri amplitudeilla simuloituilla siniaalloilla /19/.



Kuva 34. Heilahduksenvaimentimien energiahäviö vaihtelevassa sinimuotoisessa aaltoliikkeessä /19/.

Kuva 35. Päällysrakenteen taipuman vaikutus kuorma-auton vierintävastukseen ja polttoaineenkulutukseen /14/.

Kuva 36. Polttonesteen kulutusmittaukset Vt 3: moottoritiellä rinnakkaisilla asfaltti- ja betonipäällysteisillä ajoradoilla /24/.

Kuva 37. Yhteenveto eri tutkimuksista koskien polttoaineenkulutuksen muutosta verrattuna vierintävastuskertoimen muutokseen /11/.

Kuva 38. Ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen vaikuttavia tekijöitä /9/

Kuva 39. Renkaan kuluneisuuden vaikutus raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutuksen vähentymiseen Firestone-rengasvalmistajan tutkimusten mukaan /28/.

Kuva 40. Periaatekuvat vierintävastuksen mittaamisesta laboratoriossa /30/.

Kuva 41. Kaavakuva vierintävastusvoiman ja -kertoimen mittaamisesta dynamometrisellä menetelmällä /30/.

ISSN 1459-1553  
ISBN 951-803-331-5  
TIEH 3200894-v